



**Cárin Cristina de
Almeida Mateus**

**Determinação dos erros de medição
associados ao Ensaio DMT.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Professor Nuno Bravo de Faria Cruz, Auxiliar convidado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e Dr. Manuel Bravo de Faria Cruz, Assistente do Departamento de Matemática do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

“a vida parece difícil?
há pedra no caminho?
pare um instante,
respire fundo,
reflita...
olhe bem nos olhos da vida,
não como adversária,
não como inimiga,
mas como fiel companheira.”

Vivendo...

N.Rogero

o júri

presidente

Prof^a. Cristina Maria de Almeida Bernardes
professora associada no Departamento de Geociências da
Universidade de Aveiro

Prof. Nuno Bravo de Faria Cruz
professor auxiliar convidado do Departamento de Geociências da
Universidade de Aveiro

Prof. Fernando Ernesto Rocha de Almeida
professor associado no Departamento de Geociências da
Universidade de Aveiro

Prof. Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
professor auxiliar no Departamento de Engenharia Civil da
Universidade de Aveiro

agradecimentos

gostaria de expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas que directa ou indirectamente colaboraram e me ajudaram neste projecto, em especial:

ao Professor Nuno Cruz, pela sugestão deste tema de investigação e o interesse, orientação, disponibilidade e amizade que demonstrou sempre ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Para além do âmbito deste trabalho, agradeço-lhe os ensinamentos e o rigor da investigação que me soube transmitir, desde o início da minha carreira académica, e a vocação que me suscitou pela área da Geotecnia. Sem deixar de reconhecer a confiança depositada e nunca ter deixado de acreditar em mim, “Muito Obrigada!”

ao Doutor Manuel Cruz, pela disponibilidade, entusiasmo, dedicação, apoio e espírito crítico, que ultrapassaram as competências matemáticas e tornaram cada momento de maior dificuldade num momento de descontração, com os seus incentivos e instruções

aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado, e souberam nos momentos certos expressar o seu apoio e confiança com simples palavras

às minhas irmãs pela preocupação e disponibilidade demonstrada, em especial à Suse, pela facilidade com que me ouve e também pelas palavras que não preciso de dizer e mesmo assim me compreende

ao Quim, que sempre estive ao meu lado, mesmo nos momentos que sou mais chata e irritadiça, pela sua paciência e compreensão

aos meus colegas de curso, do andebol, da Mota-Engil, aos docentes e não-docentes do departamento Geociências da UA pelo apoio, pelos ensinamentos, e por todos os momentos que de uma maneira ou de outra me ajudaram a percorrer o caminho da vida.

palavras-chave

dilatómetro de Marchetti, análise numérica, aproximação do majorante do erro, erro absoluto, erro relativo, precisão, análise estatística

resumo

a evolução tecnológica verificada sobretudo nos últimos 20 anos revolucionou de forma drástica o contexto da prática da engenharia, nomeadamente pelo desenvolvimento de modelos numéricos de elevada precisão e fiabilidade, que facilitam a simulação de comportamentos e de soluções de engenharia. A eficiência e a qualidade dos resultados desses modelos estão intrinsecamente relacionadas com a selecção dos parâmetros de entrada, os quais dependem sobretudo da qualidade dos equipamentos de medição, da sua adequabilidade a cada situação particular e dos erros associados a cada um dos parâmetros medidos.

no presente trabalho, apresenta-se uma análise de sensibilidade paramétrica a fim de verificar a precisão associada e as respectivas implicações na parametrização física e mecânica dos maciços terrosos caracterizados com base no ensaio com Dilatómetro de Marchetti, DMT.

keywords

Marchetti dilatometer, numerical analysis, bringing the majorante of error, error absolute, relative error, precision, accuracy, static analysis

abstract

in the last two decades, the practice of engineering has immensely benefitted from technological evolution. Namely, the development of models and numerical methods with very high precision and efficiency, made it possible to simulate quite accurately the behaviour of engineering problems. Nevertheless, the efficiency and quality of the results obtained from such models, strongly depend on the selection of the input parameters and also on the quality of the equipment used to measure them. In particular, the adequacy of the equipment to a particular situation and the inherent errors associated to any measurement, have an important role in this process.

in this work we present an analysis of parametric sensitivity to the Marchetti Dilatometer Test, DMT, with the aim of checking its precision and the respective implications on the physical and mechanical parametrization of soils.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE QUADROS.....	XV
SIMBOLOGIA.....	XVII
CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1. FORMAÇÃO DE SOLOS	1.3
1.1. CICLO GEOLÓGICO	1.3
1.1.1. Ciclo Hidrológico.....	1.4
1.1.2. Ciclo Litológico.....	1.5
1.1.3. Ciclo Tectónico	1.6
1.2. PROCESSO SEDIMENTAR.....	1.7
1.2.1. Meteorização e Erosão.....	1.7
1.2.1.1. Meteorização Física	1.8
1.2.1.2. Meteorização Química	1.9
1.2.2. Transporte e erosão.....	1.11
1.2.2.1. Gravidade.....	1.11
1.2.2.2. Vento	1.12
1.2.2.3. Água.....	1.12
1.3. SOLOS RESIDUAIS E SOLOS TRANSPORTADOS	1.13
1.3.1. Solos Residuais	1.13
1.3.2. Solos Transportados.....	1.15
1.4. ÍNDICES FÍSICOS	1.16
1.4.1. Grandezas básicas.....	1.18
2. PARÂMETROS MECÂNICOS	2.19
2.1. ESTADO E HISTÓRIA DE TENSÕES.....	2.19
2.1.1. Estado de tensão.....	2.19
2.1.2. História de tensões.....	2.20
2.2. RESISTÊNCIA	2.20
2.2.1. Resistência Drenada.....	2.21
2.2.2. Resistência não Drenada.....	2.22
2.3. DEFORMABILIDADE.....	2.23

3.	DILATÓMETRO DE MARCHETTI	3.25
3.1.	INTRODUÇÃO	3.25
3.2.	EQUIPAMENTO	3.25
3.3.	EXECUÇÃO DO ENSAIO	3.27
3.4.	PERTURBAÇÃO INTRODUZIDA PELO EQUIPAMENTO	3.29
3.4.1.	Deformação provocada pela inserção do DMT	3.29
3.5.	PARÂMETROS E CORRELAÇÕES DO ENSAIO	3.31
3.5.1.	Parâmetros do Ensaio	3.31
3.5.1.1.	Módulo dilatométrico, E_D	3.32
3.5.1.2.	Índice de material, I_D	3.33
3.5.1.3.	Índice de tensão horizontal, K_D	3.33
3.5.1.4.	Índice de tensão neutra, U_D	3.34
3.5.2.	Parâmetros Geotécnicos	3.35
3.5.2.1.	Identificação de solos	3.35
3.5.2.2.	Estado de tensão “in situ”	3.37
3.5.2.3.	Grau de sobreconsolidação, OCR	3.41
3.5.2.4.	Parâmetros de resistência	3.43
3.5.2.5.	Parâmetros de deformabilidade	3.51
4.	PRECISÃO NAS MEDIÇÕES	4.55
4.1.	INTRODUÇÃO	4.55
4.2.	ESTIMATIVA DE ERROS	4.55
4.3.	TIPO DE ERROS	4.57
4.3.1.	Erros Grosseiros	4.58
4.3.2.	Erros Sistemáticos	4.60
4.3.4.	Erros Acidentais	4.62
4.4.4.	Outros erros	4.64
4.5.	ERROS NO ENSAIO DMT	4.65
4.5.1.	Precisão do Equipamento	4.66
4.5.1.1.	Precisão dos manómetros	4.66
4.5.1.2.	Precisão nas medições de profundidade	4.67
4.5.2.	Procedimentos no ensaio	4.68
4.5.3.	Processamento das leituras	4.71
5.	MODELO ANALÍTICO	5.73
5.1.	MODELAÇÃO NUMÉRICA	5.73

5.1.1.	Introdução.....	5.73
5.1.2.	Modelo de cálculo.....	5.73
5.2.	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	5.74
5.2.1.	Introdução.....	5.74
5.2.2.	Testes paramétricos.....	5.75
5.2.2.1.	Teste ANOVA.....	5.76
5.2.3.	Testes não paramétricos.....	5.77
5.2.3.1.	Teste de Kruskal-wallis	5.78
6.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	6.79
6.1.	PRESSUPOSTOS INICIAIS	6.79
6.1.1.	Distribuição de medições	6.79
6.1.1.1.	Aterros.....	6.80
6.1.1.2.	Solos Residuais.....	6.81
6.1.1.3.	Solos Sedimentares Argilosos.....	6.82
6.1.1.4.	Solos Sedimentares Arenosos.....	6.83
6.1.2.	Precisões de parâmetros de entrada	6.84
6.1.3.	Expressões numéricas utilizadas para o cálculo dos parâmetros geotécnicos	6.85
6.1.4.	Dados de Saída.....	6.87
6.2.	ANÁLISE DA PROPAGRAÇÃO DE ERROS.....	6.87
6.2.1.	Pressupostos Iniciais	6.88
6.2.2.	Pressões Corrigidas.....	6.89
6.2.3.	Parâmetros Intermédios	6.90
6.2.4.	Parâmetros Geotécnicos.....	6.91
6.3.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	6.93
6.3.1.	Parâmetros Básicos	6.94
6.3.2.	Propriedades Físicas.....	6.96
6.3.3.	Parâmetros Estado e História de Tensões	6.97
6.4.	EVOLUÇÃO DO ERRO RELATIVO MÉDIO COM DIFERENTES ORDENS DE GRANDEZA DE PRECISÃO DAS LEITURAS MANOMÉTRICAS.....	6.101
6.4.1.	Parâmetros Básicos	6.101
6.4.2.	Parâmetros Intermédios.....	6.102
6.4.3.	Parâmetros físicos e de estado e história de tensões.....	6.103
6.4.4.	Parâmetros de Resistência	6.104
6.4.5.	Parâmetros de Deformabilidade.....	6.105

7. CONCLUSÕES	7.107
7.1. PROPAGAÇÃO DE ERROS	7.107
7.2. COMPORTAMENTO DO MAJORANTE DO ERRO NOS DIFERENTES TIPOS DE SOLO	7.108
7.3. EVOLUÇÃO DO ERRO RELATIVO MÉDIO COM A PRECISÃO DAS LEITURAS MANOMÉTRICAS	7.109
CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
 ANEXO I	 118
ANEXO II	143
ANEXO III	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - O ciclo hidrológico, os valores referem-se a milhares de quilómetros cúbicos por ano (Adaptado de Press et al., 1997).....	1.4
Figura 1.2 - O ciclo litológico simplificado (adaptado de Press et al., 1997).	1.5
Figura 1.3 – Ilustração da desagregação da rocha-mãe e consequente evolução para solo (adaptado de Press et al., 1997).....	1.6
Figura 1.4 - O ciclo tectónico (Neves, 2000).	1.7
Figura 1.5 – Horizontes pedológicos.	1.14
Figura 1.6 – Ilustração de várias composições de solos nas fracções sólida, gasosa e líquida (adaptado de Salsa, 2004).....	1.17
Figura 1.7 - Grandezas do solo	1.18
Figura 2.1 – Determinação dos parâmetros de resistência por meio da envolvente de Mohr (Matos Fernandes, 1994).	2.21
Figura 2.2 – Envolvente de Mohr em tensões totais de uma argila – resistência não drenada (Matos Fernandes, 1994).	2.22
Figura 2.3 – Esquema de definição de extensão.	2.23
Figura 3.1 - Equipamento constituinte do ensaio, as medidas (em mm) de definição da lâmina (adaptado de Eurocódigo 7, 1997).....	3.26
Figura 3.2 – Esquema da disposição e ligação das várias componentes do ensaio DMT (Marchetti et al., 2001).	3.27
Figura 3.3 – Vários métodos de execução do ensaio DMT (adaptado de Marchetti Site).	3.28
Figura 3.4 – Sequência do procedimento de leitura e sinal áudio, do ensaio DMT (adaptado de Marchetti et al., 2001).....	3.28
Figura 3.5 – Deformações causadas pela cravação do DMT e CPT (Marchetti, 1980).	3.30
Figura 3.6 – Esquema ilustrativo necessidade de rectificação da pressão inicial, P_0 (subtracção da pressão hidrostática).....	3.34
Figura 3.7 - Diagrama para obtenção da baridade (Marchetti & Crapps, 1981).....	3.37

Figura 3.8 - Diagrama para determinação de ϕ' com base nas teorias de Durgonuglu e Mitchell (Marchetti, 1997).	3.40
Figura 3.9 – Correlações para obtenção de c' (Cruz et al., 2004).	3.50
Figura 4.1 - Ilustração da consequência de luz inadequada aquando da observação de tonalidades.	4.58
Figura 4.2 – Ilustração de registo incorrecto.	4.59
Figura 4.3 – Ilustração de introdução incorrecta dos valores no computador.	4.59
Figura 4.4 – Ilustração da variação de expansão de uma material com a temperatura.	4.60
Figura 4.5 – Ilustração de erros sistemáticos devido ao mau posicionamento da régua (Cardoso et al., 2004).	4.61
Figura 4.6 – Ilustração de erros sistemáticos devido ao posicionamento do anotador em relação ao instrumento de medição (Cardoso, et al, 2004).	4.61
Figura 4.7 - Ilustração da distribuição de valores medidos (com erros acidentais) em relação ao valor real. (Cardoso et al, 2004)	4.63
Figura 4.8 - Ilustração da distribuição de valores medidos (com erros acidentais e sistemáticos) em relação ao valor real. (Cardoso et al, 2004).	4.63
Figura 4.9 – Imagem dos dois manómetros do aparelho de medição de pressão do DMT.	4.67
Figura 4.10 – Mau posicionamento do operador em relação aos manómetros, o que induz uma leitura incorrecta.	4.68
Figura 4.11 – Consequência da distracção do operador (pode levar à introdução das varas mais de 20 cm).	4.69
Figura 4.12 – Deficiente leitura, localização do operador não está ao nível do solo (o operador tem uma perspectiva enganadora).	4.69
Figura 4.13 – Distracção do operador que provoca um desfasamento da leitura após o desligar/ligar do sinal áudio e visual.	4.70
Figura 5.1 – Ilustração de comparação de variancias (Maroco, 2007).	5.77
Figura 6.1 – Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) dos índices do ensaio.	6.94

Figura 6.2 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) das propriedades físicas do solo.	6.96
Figura 6.3 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) dos parâmetros de estado e história de tensões.....	6.97
Figura 6.4 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) dos parâmetros de deformabilidade.	6.99
Figura 6.5 – Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros básicos.	6.102
Figura 6.6 - Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros intermédios.....	6.102
Figura 6.7 - Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros de propriedades físicas e estado e história de tensões do solo.	6.103
Figura 6.8 - Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros de resistência.	6.104
Figura 6.9 - Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros de deformabilidade...	6.105

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Solos residuais em função do tipo de rocha.....	1.13
Quadro 1.2 – Perfil de meteorização em rochas ígneas e metamórficas (Patton e Deere, 1971).....	1.15
Quadro 1.3 – Tabela de expressão das grandezas físicas (Matos Fernandes, 1994).	1.18
Quadro 3.1 - Pressões corrigidas	3.31
Quadro 3.2 – Classificação de solos segundo o valor de I_D	3.36
Quadro 6.1 – Resumo das distribuições das medições (valores globais).	6.79
Quadro 6.2 - Distribuição das Medições do Grupo A - Aterro.	6.80
Quadro 6.3 - Distribuição das Medições do Grupo B – Solos Residuais.	6.81
Quadro 6.4 - Distribuição das Medições do Grupo C – Solos Sedimentares Argilosos.	6.82
Quadro 6.5 - Distribuição das Medições do Grupo D – Solos Sedimentares Arenosos.	6.83
Quadro 6.6 - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Básicos (%).	6.89
Quadro 6.7 - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Intermédios (%).	6.90
Quadro 6.8 - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Geotécnicos (%).	6.91
Quadro 6.9 – Quantidades de dados utilizada na análise estatística.....	6.93
Quadro 6.10 – Interpretação da análise estatística dos índices E_D e I_D (Figura 6.1).	6.95
Quadro 6.11 - Interpretação da análise estatística dos índices K_D e U_D (Figura 6.1).	6.95
Quadro 6.12 - Interpretação da análise estatística dos índices γ e σ'_v (Figura 6.2)...	6.96
Quadro 6.13 - Interpretação da análise estatística dos de estado e história de tensões (Figura 6.3 a) e b)).	6.98
Quadro 6.14 - Interpretação da análise estatística do OCR para os agrupamentos de solos Sedimentares argilosos e Residuais (Figura 6.3 c)).	6.98

Quadro 6.15 - Interpretação da análise estatística do parâmetro de deformabilidade confinado, M (Figura 6.4).....	6.99
Quadro 6.16 - Interpretação da análise estatística do parâmetro de deformabilidade distorsional (Figura 6.9).....	6.100

SIMBOLOGIA

À medida que vão surgindo, os símbolos utilizados no texto são definidos de forma que os respectivos significados não suscitem dúvidas. No entanto, foi elaborada uma listagem dos mais importantes. De notar que a adopção da simbologia utilizada pelos vários autores conduziria à coincidência dos mesmos símbolos para designar grandezas diferentes.

Alfabeto Latino

A	– pressão inicial no ensaio DMT
B	– pressão final de carga no ensaio DMT
c	– coesão
C	– pressão de descarga no ensaio DMT
c'	– coesão efectiva
c _u	– coesão não drenada
cm	– centímetros
D	– diâmetro da membrana
E	– módulo de elasticidade ou módulo de Young
e	– índice de vazios
E _D	– módulo dilatométrico
g	– grama
G	– densidade das partículas
G ₀	– módulo de distorsão
I _D	– índice de material
K ₀	– coeficientes de impulso em repouso
K _D	– índice de tensão horizontal (DMT)
M	– módulo de deformabilidade confinada
M _{DMT}	– módulo de deformabilidade confinado deduzido a partir do DMT

m	– metros
mm	– milímetros
n	– porosidade
P_0	– pressão correspondente a A corrigida da rigidez da membrana
P_1	– pressão correspondente a B corrigida da rigidez da membrana
P_2	– pressão correspondente a C corrigida da rigidez da membrana
q_c	– força de cravação do cone estático (CPT)
s	– segundo
S	– grau de saturação
S_0	– deslocamento na direcção normal ao plano da membrana
U_D	– índice de tensão neutra
u_0	– tensão neutra
V_t	– volume total da amostra
V_s	– volume da fase sólida da amostra
V_s	– velocidade das ondas s
V_w	– volume da fase líquida
V_a	– volume da fase gasosa
V_v	– volume de vazios da amostra
w	– teor em água
W_t	– peso total da amostra
W_a	– peso da fase gasosa da amostra
W_d	– peso da fase sólida da amostra
W_w	– peso da fase líquida da amostra
x	– variável
z_w	– profundidade
z_w	– profundidade do nível freático

Alfabeto Grego

δ	– erro absoluto
ε_a	– deformação sofrida
ε_t	– deformação tangencial
ε_v	– deformação vertical
ϕ	– ângulo de atrito
ϕ'	– ângulo de atrito efectivo
γ	– peso volúmico do solo
γ'	– peso volúmico submerso
γ_d	– peso volúmico seco
γ_s	– peso volúmico das partículas
γ_{top}	– peso específico do solo acima da primeira leitura do ensaio
γ_w	– peso específico da água
φ	– ângulo de atrito do solo
ν	– coeficiente de Poisson
ρ	– densidade
σ	– tensão normal efectiva ou total
σ'_h	– tensão efectiva horizontal
σ_{h0}	– tensão total horizontal
σ'_p	– tensão de pré-consolidação
σ_v	– tensão vertical total
σ'_v	– tensão efectiva vertical
τ	– resistência ao cisalhamento
ς	– erro relativo

Abreviaturas

CC - Câmaras de calibração

CPT – Cone Penetration Test

DMT – Marchetti Dilatometer Test

NC – Normalmente Consolidados

OC – Sobreconsolidados

OCR – Over Consolidation Ratio - Grau de sobreconsolidação

SBT – Self Boring Pressuremeter

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho tem como objectivo a apresentação e discussão dos erros associados às leituras do ensaio com Dilatómetro de Marchetti, vulgarmente designado por DMT, bem como a propagação destes através das expressões matemáticas associadas à obtenção de parâmetros.

A actualidade da engenharia impõe cada vez mais o dimensionamento através do cálculo. A complexidade de estruturas e o seu adensamento implicam a necessidade de melhor compreensão dos mecanismos desenvolvidos pelos maciços e a obtenção de resultados mais correctos, consequentemente mais seguros. Esta segurança é também quantificada pelo conhecimento das precisões das leituras e dos valores paramétricos deduzidos a partir destes ensaios.

O trabalho tem a seguinte disposição.

No Capítulo 1, Formação de Solos, descrevem-se de uma forma geral os principais processos envolvidos na formação de solos, fazendo-se uma breve referência à dinâmica do ciclo geológico como também alguns do seus sub-ciclos.

No Capítulo 2, Parâmetros Mecânicos, apresenta-se os principais parâmetros de caracterização do comportamento mecânico dos solos.

No Capítulo 3, Dilatómetro de Marchetti, apresenta uma abordagem geral do ensaio com dilatómetro de Marchetti, DMT, no que diz respeito ao equipamento e metodologia do ensaio.

No Capítulo 4, Precisão nas medições, expõe-se uma introdução teórica aos tipos de erros associados à execução de experiências, referindo quais os erros possíveis de serem cometidos na realização do ensaio DMT.

No Capítulo 5, Modelo Analítico, descreve-se a fundamentação teórica do método matemático de cálculo da propagação do erro, bem como, algumas especificações sobre análise estatística e alguns tipos de testes.

No Capítulo 6, Apresentação e análise de resultados, apresentam-se tabelas e gráficos como resumo dos dados obtidos através do software utilizado. Neste capítulo,

serão também incluídos comentários sobre situações relevantes durante a elaboração do código, acerca dos resultados obtidos.

Por último, no Capítulo 7, Conclusões, são efectuadas advertências sobre as questões de maior pertinência e comparados os resultados entre ambientes e extensões de profundidades diferentes.

Capítulo 1. FORMAÇÃO DE SOLOS

1. FORMAÇÃO DE SOLOS

A Terra funciona como um sistema evolutivo, as paisagens naturais são continuamente modeladas por rios, glaciares, vento e água subterrânea. Por outro lado, a acção humana também é causadora da modificação da topografia, clima, bacias hidrográficas, através da construção de núcleos habitacionais, estradas e/ou ferrovias, do redireccionamento dos cursos de água, entre outros.

O Planeta Terra funciona como um sistema interactivo de massa e energia que gera abalos sísmicos, zonas de formação de materiais geológicos, zonas de subducção (zona de “fusão de material geológico”), encontro de placas (as quais formam cadeias montanhosas, zonas glaciares, lagos continentais, oceânicos, etc...). São estas constantes formações e evoluções, que modelam a paisagem da superfície da terra e caracterizam o ciclo geológico.

1.1. CICLO GEOLÓGICO

Uma das principais causas da evolução constante do planeta Terra é a atmosfera. Atmosfera determina as características climáticas dos locais, caracterizando quanto á temperatura, humidade do ar, precipitação, nebulosidade e vento. Estes fenómenos são agentes que condicionam o grau de meteorização dos maciços, levando á sua evolução.

Tal como a atmosfera, os oceanos e a crosta terrestre são consequência da dinâmica interior da Terra. As forças tectónicas, accionadas pela energia proporcionada pelo interior da Terra, condicionam as placas tectónicas e mantêm-nas em movimento. Os efeitos das forças tectónicas são facilmente visíveis através das erupções vulcânicas e dos sismos.

Todas estas forças, tanto externas como internas, operam, tal como tantas outras, em ciclos. Serão apresentados, brevemente, três desses ciclos que, no seu conjunto, formam o ciclo geológico:

- Ciclo hidrológico
- Ciclo litológico
- Ciclo tectónico (sub-ciclo de ciclo litológico)

1.1.1. CICLO HIDROLÓGICO

O grande processo geodinâmico que é o ciclo geológico, abrange outros ciclos de menor dimensão, entre os quais se encontra o ciclo da água ou ciclo hidrológico. A água é a única substância que existe, em circunstâncias normais, em todos os três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) na Natureza. A coexistência destes três estados, implica que existam transferências contínuas de água de um estado para outro; este movimento da superfície para a atmosfera e vice-versa é o ciclo da água.

À superfície da Terra ou abaixo dela, a água move-se ciclicamente entre os principais reservatórios: os oceanos, a atmosfera e os continentes, passando dos oceanos para a atmosfera por evaporação, precipitando sobre os continentes e oceanos e, através da escorrência (superficial ou subterrânea) para os cursos de água, volta para o oceano. Este fluxo contínuo constitui o ciclo hidrológico (Figura 1.1).

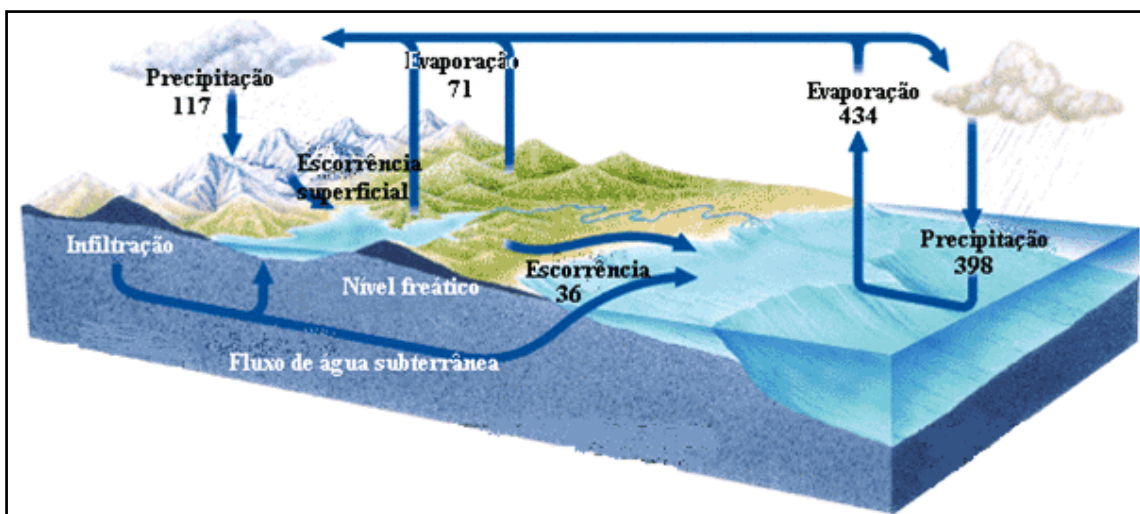


Figura 1.1 - O ciclo hidrológico, os valores referem-se a milhares de quilómetros cúbicos por ano (Adaptado de Press et al., 1997).

O *ciclo hidrológico* actua como um agente modelador da crosta terrestre devido à erosão, transporte e deposição de sedimentos por via hidráulica, condicionando a cobertura vegetal e, de modo mais genérico, toda a vida na terra.

1.1.2. CICLO LITOLÓGICO

O ciclo litológico engloba uma série de processos através dos quais as rochas formadas em profundidade como as magmáticas e metamórficas vão sofrendo alterações de vários tipos, relacionados quer com a geodinâmica interna quer com a geodinâmica externa, originando materiais que ao acumularem-se dão origem às rochas sedimentares, estes materiais poderão dar origem novamente às rochas iniciais e assim sucessivamente descrevendo o ciclo das rochas ou ciclo litológico.

A Figura 1.2 representa um ciclo genérico, tendo em conta que tais ciclos variam com o tempo e o lugar. O ciclo pode ser descrito iniciando no magma no interior da Terra, onde as temperaturas e as pressões são suficientemente altas para fundir qualquer tipo de rocha pré-existente, seja ela ígnea, metamórfica ou sedimentar.

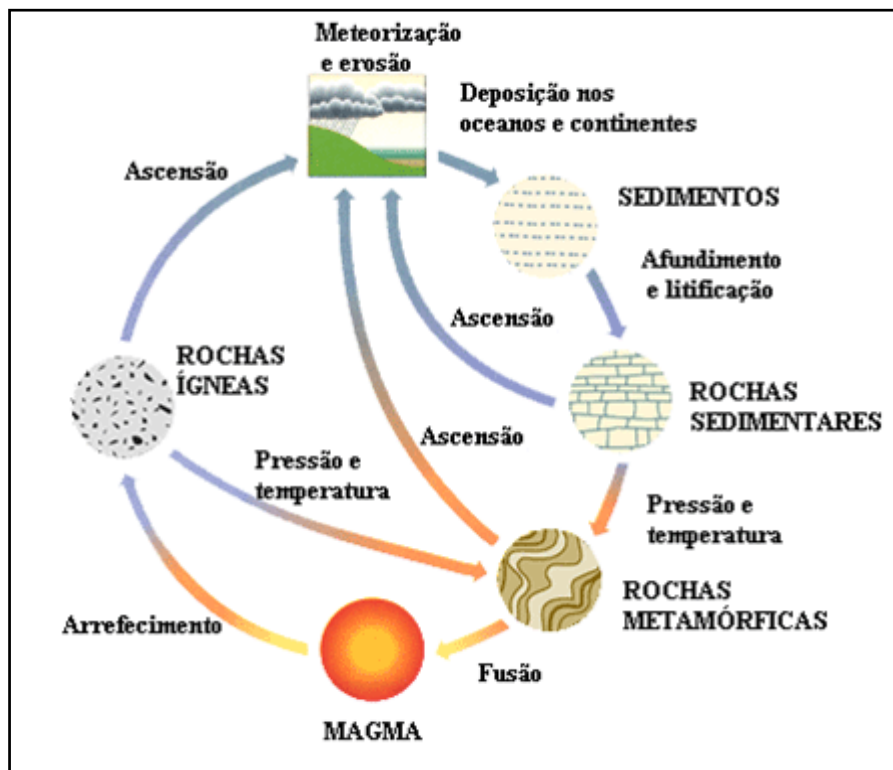


Figura 1.2 - O ciclo litológico simplificado (adaptado de Press et al., 1997).

A ascensão das rochas para a superfície provoca a exposição a agentes de meteorização, criando material solto (Figura 1.3). Este material pode ser continuamente alterado no local, sem que haja transporte, ou pode ser transportado e depositado noutro local e assim evoluir segundo as novas condições de meteorização.

O grau de meteorização depende da relação entre as condições atmosféricas e tipo de rocha, nomeadamente os minerais constituintes. Isto porque, quanto mais adversas forem as novas condições de pressão e temperatura, mais vulnerável estará a rocha, ou seja, os seus minerais constituintes.

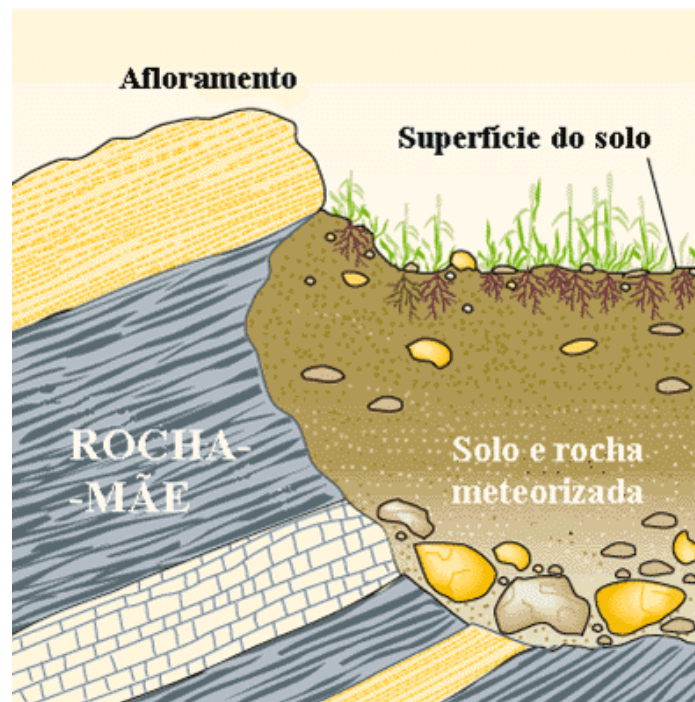


Figura 1.3 – Ilustração da desagregação da rocha-mãe e consequente evolução para solo (adaptado de Press et al., 1997).

1.1.3. CICLO TECTÓNICO

O ciclo tectónico não é mais que um sub-ciclo do ciclo litológico, o qual se inicia com o afundimento e subsidência dos sedimentos, seguido da sua compressão, dobramento, falhamento e metamorfismo, e finalizando com o levantamento montanhoso e a erosão, que vai proporcionar os sedimentos para que tudo se reinicie (Figura 1.4).



Figura 1.4 - O ciclo tectónico (Neves, 2000).

O *ciclo Tectónico* é um conjunto de processos geológicos, com repetição cíclica, relacionados com as grandes estruturas constituintes da crosta terrestre.

1.2. PROCESSO SEDIMENTAR

1.2.1. METEORIZAÇÃO E EROSÃO

A meteorização e a erosão não só estão intrinsecamente ligadas como também são os principais processos do ciclo litológico. Juntamente com a tectónica e o vulcanismo, os outros elementos do ciclo litológico, a meteorização e erosão modificam a forma da superfície terrestre e alteram o material rochoso, convertendo todos os tipos de rochas em sedimentos e formando solos, os quais evoluem novamente para maciços rochosos.

A *meteorização* é a etapa inicial de desgaste e/ou decomposição da superfície terrestre, por acção dos efeitos químicos, físicos e biológicos que resultam da sua exposição aos factores ambientais (neles se incluem os factores antropogénicos, isto é, devido directa ou indirectamente à acção humana).

O processo de meteorização das rochas inicia-se com a separação de fragmentos rochosos, através de acções mecânicas, aumentando a área de superfície vulnerável ao ataque químico provocado pela acção da água e outros agentes químicos.

A meteorização pode assim ser dividida em física (ou também designada por, mecânica ou de desagregação) e química (ou alteração). A primeira implica a separação de fragmentos rochosos, enquanto, a segunda representa a destruição da estrutura cristalina dos minerais constituintes da rocha.

A maior ou menor influência que os processos de meteorização podem assumir sobre um determinado tipo de rocha, como também nos seus produtos resultantes, é determinada pela natureza da rocha mãe, quer pela composição mineralógica quer pela sua textura (nomeadamente, composição química e temperatura e pressão de formação). A geomorfologia influencia fortemente o grau e a velocidade de meteorização, uma vez que controla o ritmo de escoamento da água superficial, consequentemente, domina o ritmo de remoção dos componentes solúveis dos minerais constituintes e condiciona os ritmos erosivos e consequente exposição de minerais não alterados. O clima, o qual está directamente ligado ao ciclo hidrológico e a factores geomorfológicos, condiciona todo o processo de erosão e transporte através de factores como a intensidade pluviométrica, temperatura e amplitudes térmicas. Adicionalmente, a flora tem acção sobre os materiais geológicos, essencialmente, através da libertação de ácidos orgânicos que reagem com os minerais, captação de água (o que proporciona um ambiente húmido nas proximidades vegetação – rocha), aumento das raízes (o que provoca o aumento do espaçamento entre fracturas, aumentando assim a superfícies de exposição), etc.

1.2.1.1. METEORIZAÇÃO FÍSICA

A *meteorização física* ocorre quando a rocha sólida se fragmenta por processos físicos, que não alteram a sua composição química. Os principais processos físicos envolvidos na desagregação das rochas são (Cruz, 1995):

- Expansão diferencial por alívio de pressão;
- Desenvolvimento de cristais nas fracturas e nos poros;
- Contração e expansão devido a ciclos de aquecimento e arrefecimento.

As rochas alcançam a superfície depois da desintegração e erosão das rochas suprajacentes. A remoção do material provoca um alívio de carga (pressão), que possibilita a descompressão e consequentemente origina a abertura de fissuras, conhecidas como fissuras de descompressão. Estas fissuras aumentam a superfície susceptível à penetração da água, raízes de plantas, etc., que por seu lado exercem forças de expansão devido ao congelamento da água (o que implica um aumento de

volume de cerca de 9%) e aumento volumétrico das raízes, devido à sua natural evolução e crescimento.

Os ciclos de aquecimento e arrefecimento provocam a acumulação de sais, por supersaturação, no decorrer do processo de evaporação, originando forças desagregadoras importantes localizadas no interior dos maciços. Estes ciclos de variação térmica provocam ainda variações volumétricas que conduzem ao incremento da fracturação pré-existente.

1.2.1.2. METEORIZAÇÃO QUÍMICA

Genericamente a *meteorização química* ocorre quando os minerais numa rocha são alterados ou dissolvidos quimicamente. Esta alteração química é estritamente dependente do tipo de rocha, nomeadamente da sua mineralogia e condições de génese.

As rochas cujas condições de formação se encontram em intervalos de pressão e temperatura elevados, designadamente as rochas ígneas e metamórficas, são susceptíveis à meteorização através de reacções de libertação de calor, com produção de compostos de maior volume e menor densidade, como reacção de estabilização às novas condições superficiais.

A meteorização química pode ser descrita em cinco tipos principais de reacções e em todos estes existe a intervenção da água.

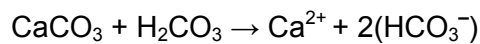
- Oxidação;
- Carbonatação;
- Hidratação;
- Troca de bases;
- Incorporação de cationes em depósitos orgânicos.

Oxidação

Processo de meteorização química, pelo qual o oxigénio atmosférico (dissolvido na água) reage com os iões dos minerais, produzindo óxidos. Este processo é especialmente importante na meteorização de minerais, com teores elevados de ferro (minerais ferromagnesianos – olivinas, piroxenas e anfíbolos).

Carbonatação

Reacção em que ocorre a alteração e destruição química de calcários, que se traduz pela seguinte equação química:



sendo que a cada substância expressa na equação corresponde, respectivamente, as designações: carbonato de cálcio, ácido carbónico, ião cálcio e ião hidrogenocarbonato.

Hidrólise

A hidrólise dos materiais rochosos é uma reacção química lenta e específica, na qual os iões dos minerais reagem com os iões H^+ e HO^- da água, podendo originar novos minerais.

Hidratação

A hidratação envolve a adição de uma molécula completa de água à estrutura mineral. A água usada no processo causa expansão dos minerais, pelo que é também considerada uma forma de meteorização física.

Troca de bases

Envolve a transferência, mútua de catiões entre uma solução aquosa rica em catiões de um dado tipo e um mineral rico noutro. Este intercâmbio poderá provocar expansão ou desagregação completa da estrutura cristalina do mineral, libertando ainda outros compostos químicos.

Quelação

É um processo complexo, através do qual catiões metálicos são incorporados nas moléculas de diversos compostos orgânicos através de fortes ligações químicas.

1.2.2. TRANSPORTE E EROSÃO

É difícil estabelecer com rigor fronteiras entre os processos de erosão e transporte, uma vez que na maior parte dos casos os agentes que os determinam são os mesmos, funcionando de uma maneira ou de outra consoante a sua energia e as dimensões dos materiais a remover.

Os agentes modeladores do relevo variam sobretudo em função dos condicionalismos climáticos, litológicos, estruturais e topográficos de uma dada região. Assim, por exemplo, a acção dos rios só se faz sentir onde houver águas correntes, da mesma forma que os glaciares só se encontram a latitudes e/ou altitudes que permitam a formação e manutenção de gelo. Afloramentos de rochas carbonatadas e de rochas intrusivas ou metamórficas respondem de formas diferentes ao mesmo agente erosivo. Do mesmo modo, por uma questão de diferença de energia dos agentes erosivos, os processos e efeitos que se verificam numa região montanhosa são diferentes dos verificados numa planície.

Estes condicionalismos reflectem-se nas diferentes paisagens de características geomorfológicas bem definidas que podemos encontrar à face da Terra, as quais são compatíveis com os agentes erosivos que se encontram a actuar sobre elas.

Os materiais resultantes da meteorização e removidos do local estão sujeitos a deslocamento por acção da gravidade, pelo vento ou pela água (no estado líquido ou no estado sólido). Existem, no entanto, materiais que permanecem perto do local onde têm origem formando os 'depósitos residuais'.

1.2.2.1. GRAVIDADE

O transporte por gravidade ocorre quando uma massa não é "empurrada", primariamente, para baixo por intermédio de um agente erosivo, tal como a água corrente, o vento ou o gelo dos glaciares, mas sim por uma força gravítica que vence a resistência à deformação dos materiais do declive. Estes movimentos podem ser despoletados por sismos, inundações ou por outros eventos geológicos. Os materiais movem-se, então, declive abaixo, quer a uma velocidade baixa ou mesmo muito baixa, quer súbita e, na maior parte das vezes, catastroficamente. Podendo cair, deslizar ou fluir, os movimentos de massa podem deslocar pequenas, quase imperceptíveis,

quantidades de solo ao longo de um declive fraco ou podem constituir enormes desprendimentos de terra que despejam toneladas de solo e rocha nos vales adjacentes às vertentes montanhosas abruptas.

1.2.2.2. VENTO

O vento, como agente de erosão, actua principalmente sobre materiais soltos, de granulometria fina e desprovidos de vegetação ou de humidade. Apesar da sua capacidade se resumir a materiais de granulometria fina, este agente pode promover distâncias consideráveis, aquando de trajectos favoráveis. Este transporte pode ser efectuado por suspensão, saltação ou deslizamento.

1.2.2.3. ÁGUA

A água é o principal agente de transporte dos materiais resultantes da meteorização das rochas. Estes materiais podem ser transportados em solução ou sob a forma de detritos ou clastos. O transporte efectuado pela água pode ser feito quando esta está no estado sólido (glaciares) ou quando está no estado líquido (águas selvagens, torrentes, rios, lagos, águas subterrâneas, mares) por suspensão, saltação, deslizamento ou rolamento, e ainda em solução.

Gelo

Os glaciares em comparação com os rios têm tido uma menor participação no desgaste dos continentes. No entanto, o gelo é um agente de grande capacidade, mas que percorre distâncias reduzidas. Por seu lado, o gelo, sendo uma massa sólida, arrasta todos os fragmentos, independentemente do seu tamanho, resultando numa fraca selecção dos fragmentos rochosos e/ou minerais.

1.3. SOLOS RESIDUAIS E SOLOS TRANSPORTADOS

1.3.1. SOLOS RESIDUAIS

Um solo residual ou “in situ” é proveniente da decomposição e degradação de rocha subjacente. A sua evolução dá-se a partir das rochas e caracterizam-se pela perda de resistência e aumento de deformabilidade, no tempo, pela variação da granulometria devida à decomposição dos minerais instáveis e pela existência de uma estrutura de cimentação típica.

A composição deste tipo de solo depende da composição mineralógica da rocha original. Chiossi (1979) elaborou o seguinte quadro, que fornece alguns exemplos.

Quadro 1.1 – Solos residuais em função do tipo de rocha.

Tipo de rocha	Composição mineral	Tipo de solo	Composição
Basalto	Plagioclase, piroxenas	Argiloso	Argila
Quartzito	quartzo	Arenoso	Quartzo
Filitos	Sericite	Argiloso	Argila
Granito	Quartzo, feldspato, mica	Areno-argiloso	Quartzo e argila
Calcário	Calcite	Argiloso	Argila

A distinção entre solo e rocha não é um limite brusco e directo, mas sim, uma transformação gradual. Segundo a perspectiva da Pedologia o perfil do solo pode ser dividido em quatro horizontes principais distintos, como mostra a Figura 1.5.

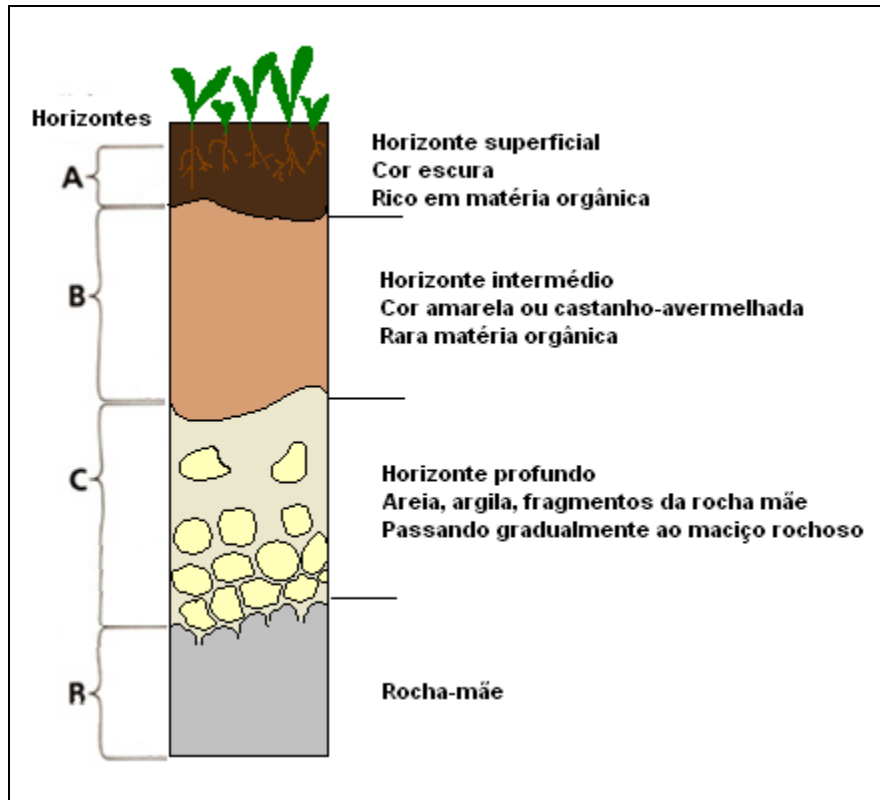


Figura 1.5 – Horizontes pedológicos.

Sob o ponto de vista da geotecnia, diversos autores entre os quais Patton e Deere (1971) propuseram perfis de meteorização que são apresentados no Quadro 1.2.

Quadro 1.2 – Perfil de meteorização em rochas ígneas e metamórficas (Patton e Deere, 1971).

	Descrição	RQD (NX)	Q (NX)	Permeabilidade relativa	Resistência relativa
Solo residual					
IA-Horizonte A	Solo superficial, com matéria orgânica; zona de lixiviação e eluviação.	--	0	média a alta	baixa a média
IB-Horizonte B	Zona rica em argila, concentrações de ferro, alumínio e silício, podendo resultar cimentação.	--	0	baixa	normalmente baixa
IC-Horizonte C	Presença de estruturas herdadas; boa graduação em materiais silteosos e arenosos; menos de 10 % de matacões.	0	0-10%	média	baixa a média
Rocha alterada					
IIA-Transição	Diversificada, desde materiais terrosos a rochosos; areia fina a grossa; 10 a 95% de matacões.	0-50%	10-90%	alta	média a baixa
IIB-Rocha parcialmente alterada	Rocha branda a dura; descontinuidades em graus de alteração distintos; feldspatos e micas parcialmente alterados.	50-75%	> 90%	média a alta	média a alta
Rocha sã	Descontinuidades inalteradas sem evidências ferrosas; feldspatos e micas inalteradas.	> 75%	em geral 100%	baixa a média	muito alta

1.3.2. SOLOS TRANSPORTADOS

Os solos transportados são provenientes de erosão, transporte e deposição de solos pré-existent. Estes solos tendem a ser controlados, sob o ponto de vista mecânico, pela evolução do índice de vazios, o que se traduz num aumento da resistência e diminuição da deformabilidade com o tempo, dado que partem de um estado solto, no momento da sedimentação, tornando-se progressivamente mais densos no decurso dos fenómenos diagenéticos.

Os solos transportados podem ser divididos em vários tipos:

- **Orgânico:** são solos ricos em matéria orgânica, que se mistura com o solo transportado;
- **Aluvião:** é constituído por material erodido, retrabalhado e transportado pelos cursos de água e depositado nos seus leitos e margens, ou ainda em fundos e margens de lagoas e lagos, sempre associados a ambientes fluviais.
- **Coluvião:** é constituído por depósitos de material solto, encontrados no sopé de encostas e que foram transportados pela acção da gravidade ou, simplesmente, material decomposto, transportado por gravidade;
- **Eólicos:** solos transportados pelo vento.

1.4. ÍNDICES FÍSICOS

O solo é produto de alteração da rocha, estas alterações provocadas pelos agentes erosivos causam um aumento de vazios. Estes vazios podem estar totalmente preenchidos por água, o que indica que o solo está saturado (Figura 1.6 a)), podem estar completamente ocupados por ar, o que significa que o solo está seco (Figura 1.6 b)), ou pode ter na sua constituição ar e água (Figura 1.6 c)), sendo normalmente a forma mais comum na natureza. Por isso, de modo geral, diz-se que o solo é composto por três fases: sólida, líquida e gasosa. As três fases do solo estão profundamente interligadas, conferindo a este as características de um sistema dinâmico.

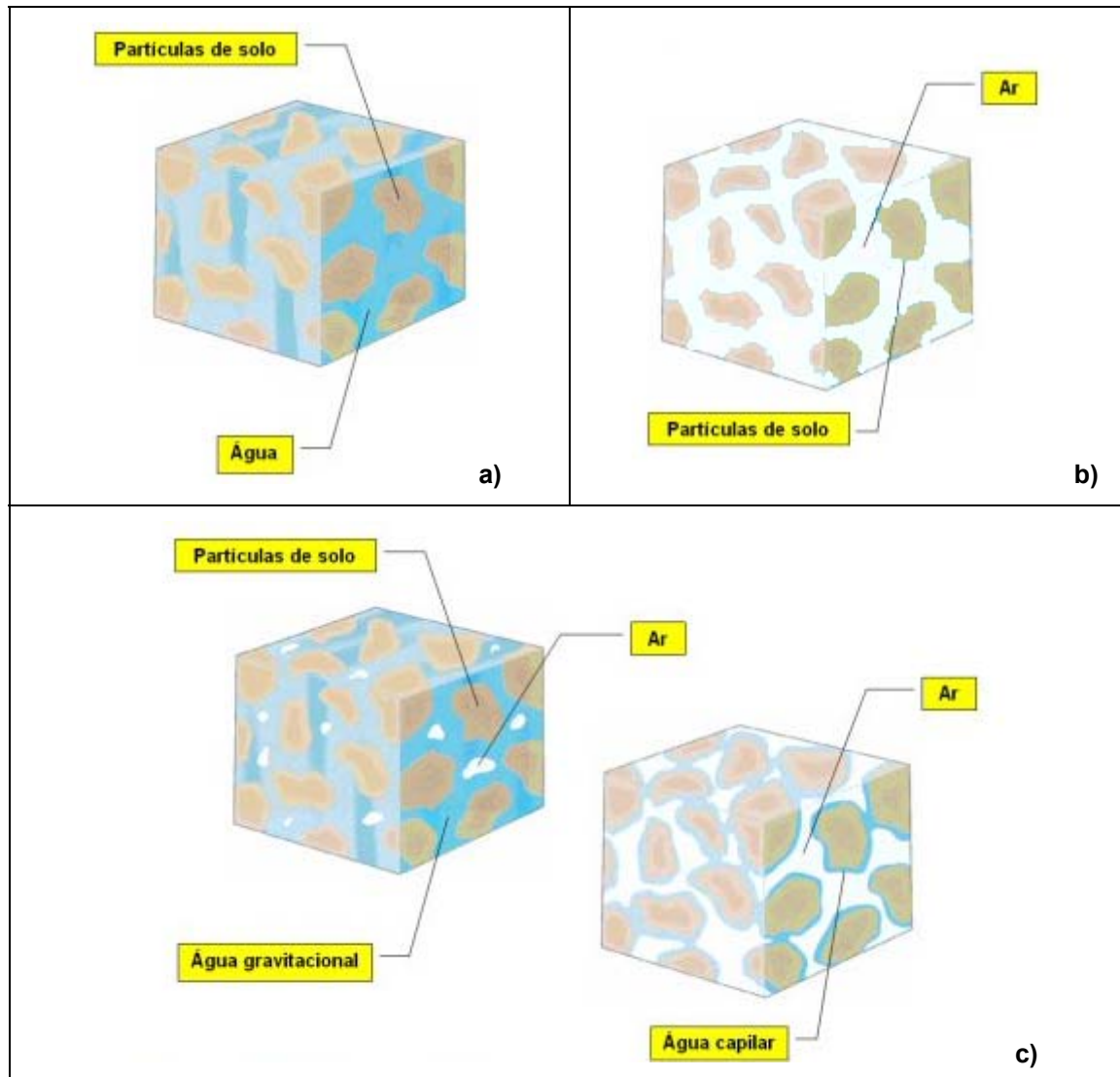


Figura 1.6 – Ilustração de várias composições de solos nas frações sólida, gasosa e líquida (adaptado de Salsa, 2004).

Consideram-se como índices físicos, determinadas características, tanto da fase sólida, como das três fases, em conjunto, passíveis de quantificação, seja mediante relações entre fases ou por meio de avaliações do comportamento do solo, através de ensaios convencionais.

1.4.1. GRANDEZAS BÁSICAS

Os índices físicos dos solos são utilizados na caracterização do seu estado físico. Sendo este um material polifásico é preciso conhecer as grandezas de cada elemento constituinte. Uma forma hipotética de representar as grandezas do solo está ilustrada na Figura 1.7. O Quadro 1.3 apresenta as expressões numéricas que permitem a determinação das grandezas físicas do solo.

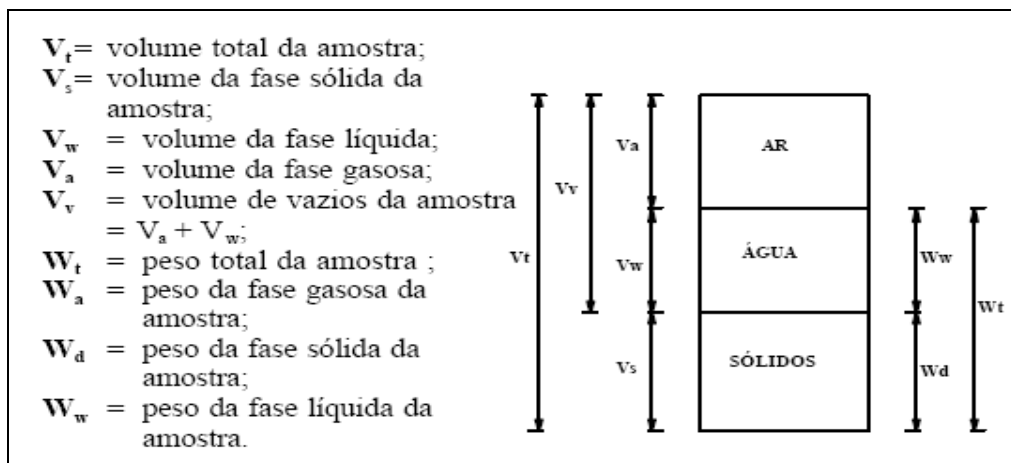


Figura 1.7 - Grandezas do solo

Quadro 1.3 – Tabela de expressão das grandezas físicas (Matos Fernandes, 1994).

GRANDEZA	EXPRESSÃO	OBSERVAÇÕES
Índice de vazios	$e = \frac{V_v}{V_s}$	
Porosidade	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$	Exprime-se em %.
Grau de saturação	$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100$	Exprime-se em %.
Teor em água	$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100$	Exprime-se em %.
Peso volúmico do solo	$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V}$	Exprime-se em kN/m ³ . Também se chama peso volúmico aparente ou total.
Peso volúmico seco	$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$	Exprime-se em kN/m ³ .
Peso volúmico das partículas	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$	Exprime-se em kN/m ³ . É em geral próximo de 26kN/m ³ .
Peso volúmico submerso	$\gamma' = \gamma - \gamma_w$	Exprime-se em kN/m ³ . Também se usa γ_{sub} em vez de γ' . $\gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$.
Densidade das partículas	$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$	É em geral próximo de 2,65.

Capítulo 2. Parâmetros mecânicos

2. PARÂMETROS MECÂNICOS

O comportamento dos solos é habitualmente representado por parâmetros numéricos, que caracterizam, globalmente, os seguintes domínios:

- História e estado de tensões;
- Resistência;
- Deformabilidade.

2.1. ESTADO E HISTÓRIA DE TENSÕES

2.1.1. ESTADO DE TENSÃO

Um maciço terroso (solo) está sujeito a tensões, as quais podem ser divididas em tensões virgens (independentes de qualquer acção humana) e tensões induzidas (relacionadas com acções impostas pelas obras implementadas, pela humanidade, sobre o maciço ou no seu interior).

Por seu lado, as tensões virgens podem ser divididas em tensões de repouso (associadas ao próprio peso) e tensões tectónicas (desenvolvidas por forças no interior da crosta), sendo que esta última não tem aplicabilidade significativa nos maciços terrosos.

A definição de estado de tensão “in situ” implica a avaliação das tensões efectivas vertical, σ'_v , e horizontal, σ'_h . Uma vez que no caso dos solos apenas as forças gravíticas têm influência, a determinação da tensão efectiva vertical é efectuada, através da expressão:

$$\sigma'_v = \gamma \times z \quad (2.1)$$

Em que γ representa a baridade do solo e z a profundidade a que se pretende a determinação.

A determinação da tensão horizontal pode ser realizada através de ensaios “in situ” ou indirectamente através de um parâmetro característico dos solos denominado de coeficiente de impulso em repouso, K_0 , o qual se define como a relação entre as tensões efectivas horizontal e vertical,

$$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v \quad (2.2)$$

2.1.2. HISTÓRIA DE TENSÕES

A história de tensões a que o solo foi submetido, é um dado fundamental para perceber o comportamento mecânico do solo. Principalmente no que diz respeito aos solos de natureza argilosa, pois as características de resistência como, particularmente, relações tensão-deformação dependem dos níveis de tensão e ciclos de carga-descarga-recarga a que o solo esteve sujeito.

A história de tensões a que o solo foi submetido é habitualmente traduzida pela razão de sobreconsolidação, OCR, definida como a relação entre a tensão de pré-consolidação, ou seja, a máxima tensão a que um solo foi submetido, (σ'_p) e a tensão efectiva vertical actual (σ'_{v0}).

Quando a tensão de pré-consolidação toma um valor igual à tensão efectiva vertical, diz-se que o solo é normalmente consolidado (OCR=1). Por outro lado, quando a tensão efectiva vertical de repouso é inferior à tensão máxima a que o solo foi submetido, OCR toma valores superiores à unidade, e diz-se que o solo é sobreconsolidado. No caso inverso, quando σ'_p é inferior a σ'_{v0} , o solo encontra-se em fase de consolidação hidrodinâmica, para o nível de tensão vertical suprajacente, a qual corresponde à designação de solo sub-consolidado.

2.2. RESISTÊNCIA

Normalmente, o estudo do comportamento mecânico dos solos (em termos de resistência) é dividido em duas situações distintas: condições não drenadas, onde o critério de Tresca é válido, e condições drenadas cuja envolvente de rotura respeita o critério de Mohr. Esta distinção deve-se fundamentalmente a diferenças de permeabilidade dos solos. Sendo os solos arenosos caracterizados por

comportamentos drenados enquanto que os solos argilosos exibem tanto comportamentos drenados (longo prazo) como não drenados (curto prazo).

2.2.1 RESISTÊNCIA DRENADA

O comportamento drenado é caracterizado pelos parâmetros ângulo de atrito e coesão. A sua definição deriva da utilização da envolvente de resistência de Mohr (Figura 2.1).

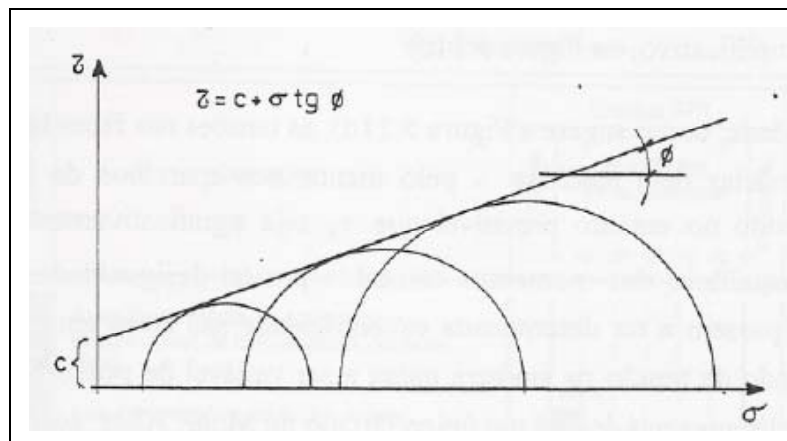


Figura 2.1 – Determinação dos parâmetros de resistência por meio da envolvente de Mohr (Matos Fernandes, 1994).

Num sistema cartesiano ortogonal, representam-se as tensões normais (σ) no eixo das abcissas e as tensões tangenciais (τ) no eixo correspondente às ordenadas, com valores obtidos experimentalmente no plano de rotura. Por meio do Critério de Coulomb adequa-se uma recta aos pontos situados no diagrama dentro de uma determinada faixa de tensões de interesse ao estudo. A recta obtida fornece uma envolvente, assumida como equação geral de resistência do solo, e que possui a seguinte forma:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2.3)$$

onde,

τ - resistência ao cisalhamento

c - coesão

σ - tensão normal efectiva ou total

$\tan \varphi$ - coeficiente de atrito

φ - ângulo de atrito do solo

2.2.2. RESISTÊNCIA NÃO DRENADA

O comportamento de solos não drenado e o parâmetro de resistência é definido por coesão não drenada e a sua determinação pode ser através da envolvente de Mohr. Havendo a particularidade de a envolvente ser paralela ao eixo dos xx , ou seja, da tensão, como mostra a Figura 2.2.

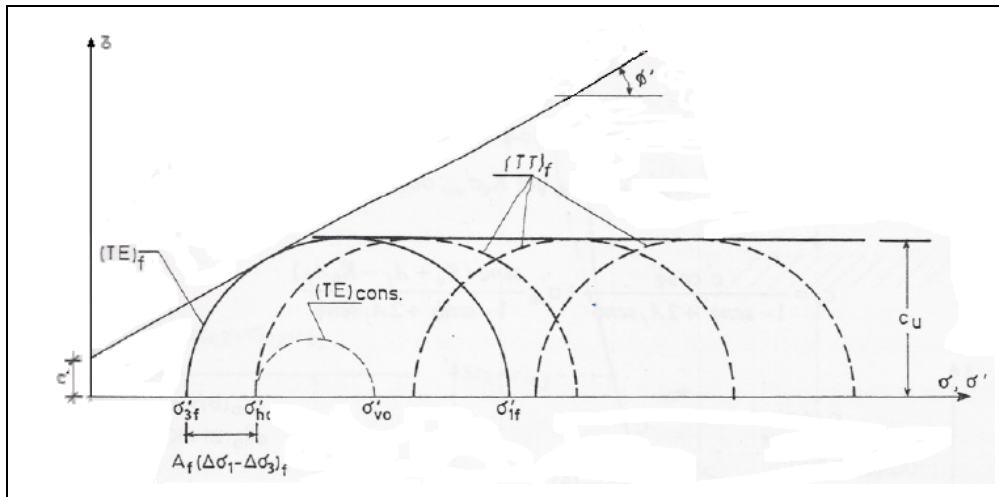


Figura 2.2 – Envolvente de Mohr em tensões totais de uma argila – resistência não drenada (Matos Fernandes, 1994).

Matos Fernandes (1994) acrescenta que num solo com condições não drenadas o crescimento da tensão normal média, apenas faz deslocar para a direita as circunferências de Mohr em tensões totais na rotura, sem aumentar o respectivo raio, isto é, a resistência ao corte. Em consequência, a envolvente de Mohr em tensões totais para uma argila submetida a ensaios triaxiais não drenados, partindo de um dado estado de tensão efectiva de consolidação, é paralela ao eixo das abcissas. Nessas condições, a argila tem ângulo de atrito nulo, obedece pois ao critério de rotura de Tresca. A máxima tensão de corte mobilizável no solo designa-se por resistência não drenada, c_u , parâmetro com uma enorme relevância prática nos problemas que envolvem o carregamento não drenado de argilas.

2.3. DEFORMABILIDADE

Deformabilidade de um solo depende das forças que sobre este actuam e das suas capacidades elásticas.

Para descrever as propriedades elásticas dos meios tanto isotrópicos como anisotrópicos, recorre-se frequentemente às seguintes constantes:

- **módulo de Young**, E , ou módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida de rigidez, obtém-se através da razão entre a tensão exercida, σ_a , e a extensão axial sofrida, ε_a , isto é:

$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \quad (2.4)$$

- **coeficiente de Poisson**, ν , define-se como a razão da deformação tangencial, ε_t , pela deformação axial, ε_a ;

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} \quad (2.5)$$

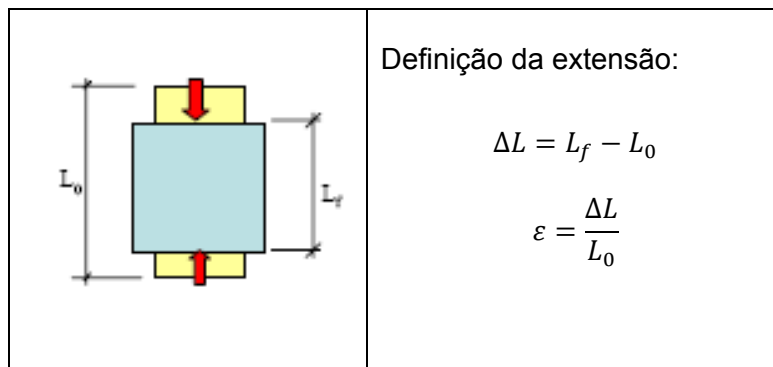


Figura 2.3 – Esquema de definição de extensão.

- **módulo de deformabilidade tangente confinado**, M , é definido pela razão da variação da tensão efectiva vertical com a variação da extensão vertical:

$$M = \frac{\Delta \sigma'_v}{\Delta \varepsilon_v} \quad (2.6)$$

- **módulo de distorsão**, G_0 , corresponde a muito pequenas deformações (valores de deformações da ordem de 10^{-6}), nas quais o solo apresenta um comportamento quase elástico e linear. A sua determinação é possível mediante vários ensaios, entre o quais os métodos sísmicos (das velocidades V_s) conforme a equação 2.7.

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (2.7)$$

Capítulo 3. Dilatómetro de Marchetti

3. DILATÓMETRO DE MARCHETTI

3.1. INTRODUÇÃO

O ensaio com o Dilatômetro de Marchetti, também conhecido por DMT, foi desenvolvido em Itália por Silvano Marchetti, Professor na Universidade de L'Áquila, Roma, tendo sido apresentado pela primeira vez em 1980.

O DMT ganhou grande importância como um dos ensaios “in situ” mais populares na última década. Esta popularidade é devida à filosofia de base de Marchetti na concepção deste equipamento, ou seja, equipamento portátil, de fácil manuseamento e robustez acentuada, fácil reparação “in situ”, consideravelmente independente de sondagens e cujas perturbações causadas pela inserção da lâmina são menores do que aquelas causadas pelos outros ensaios com o mesmo princípio (Cruz, 1995).

Através de correlações semi-empíricas pode obter-se uma variada gama de parâmetros geotécnicos relacionados com o estado de tensão, história de tensões, resistência e deformabilidade.

O seu campo de aplicação engloba, solos granulares ou coesivos, soltos a densos e moles a duros, respectivamente. As principais aplicações, do ponto de vista geológico-geotécnico, são: determinação de horizontes geológico-geotécnicos, avaliação paramétrica, cálculo da capacidade de carga e avaliação de assentamentos.

3.2. EQUIPAMENTO

O equipamento do DMT é constituído por uma lâmina de aço plana, biselada na sua extremidade inferior, com 14mm de espessura, 96 mm de largura e 220mm de comprimento. A lâmina possui uma membrana de aço flexível, de 60 mm de diâmetro, expansível numa das faces. A Figura 3.1 esquematiza os intervalos de dimensões de todas as partes constituintes da lâmina do DMT, em várias perspectivas. A membrana flexível expande segundo um dispositivo de medida colocado no seu lado interno, ligado a uma buzina e a um galvanómetro.

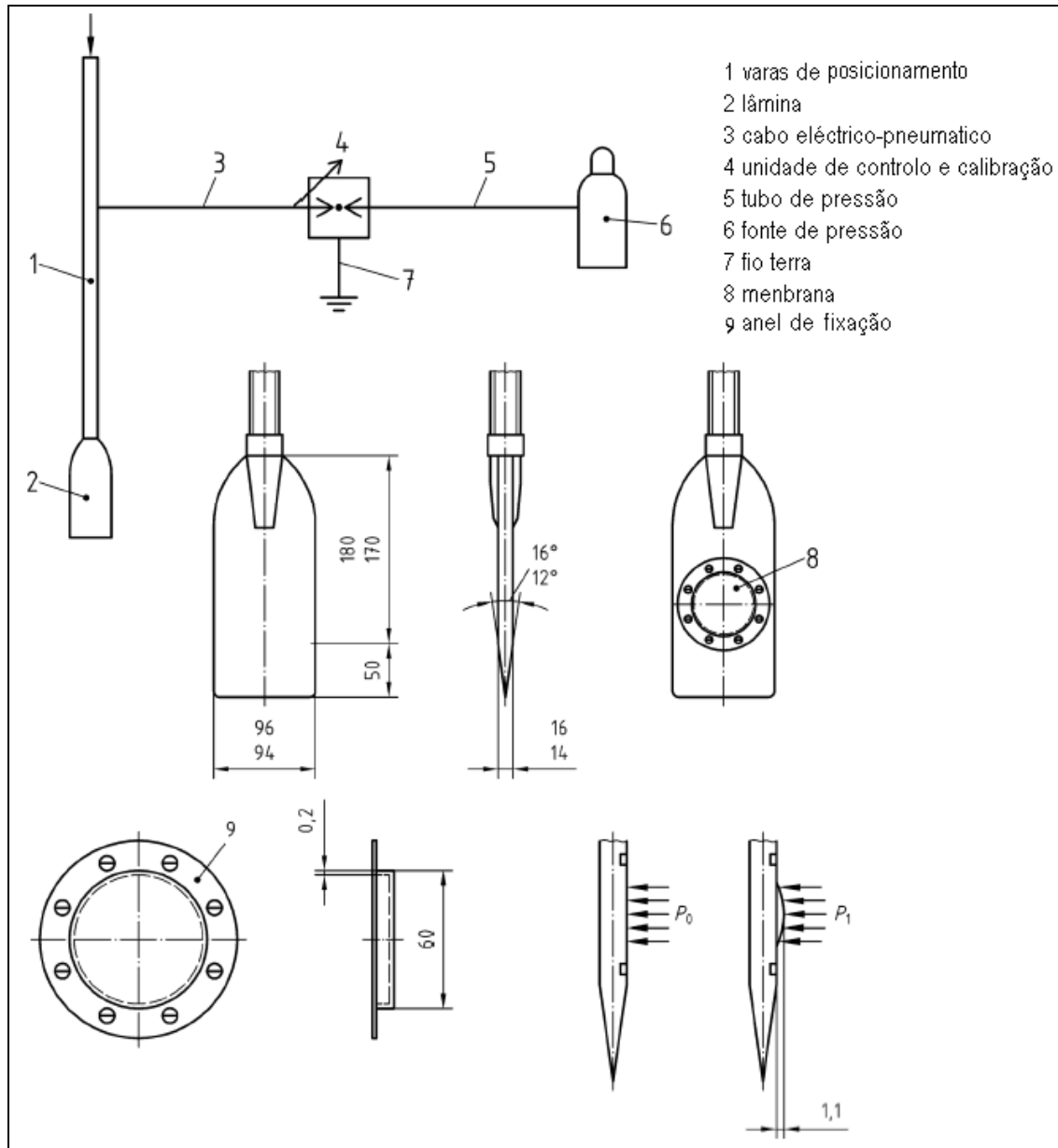


Figura 3.1 - Equipamento constituente do ensaio, as medidas (em mm) de definição da lâmina (adaptado de Eurocódigo 7, 1997).

A lâmina está ligada a uma unidade de controlo, que engloba um dispositivo de medição e controlo de pressões através de um cabo eléctrico e um tubo condutor de gás pressurizado, o qual é utilizado para fazer expandir a membrana de aço flexível, ambos conduzidos no interior das varas utilizadas na cravação da lâmina. Na Figura 3.2 representa-se o equipamento utilizado no ensaio DMT.

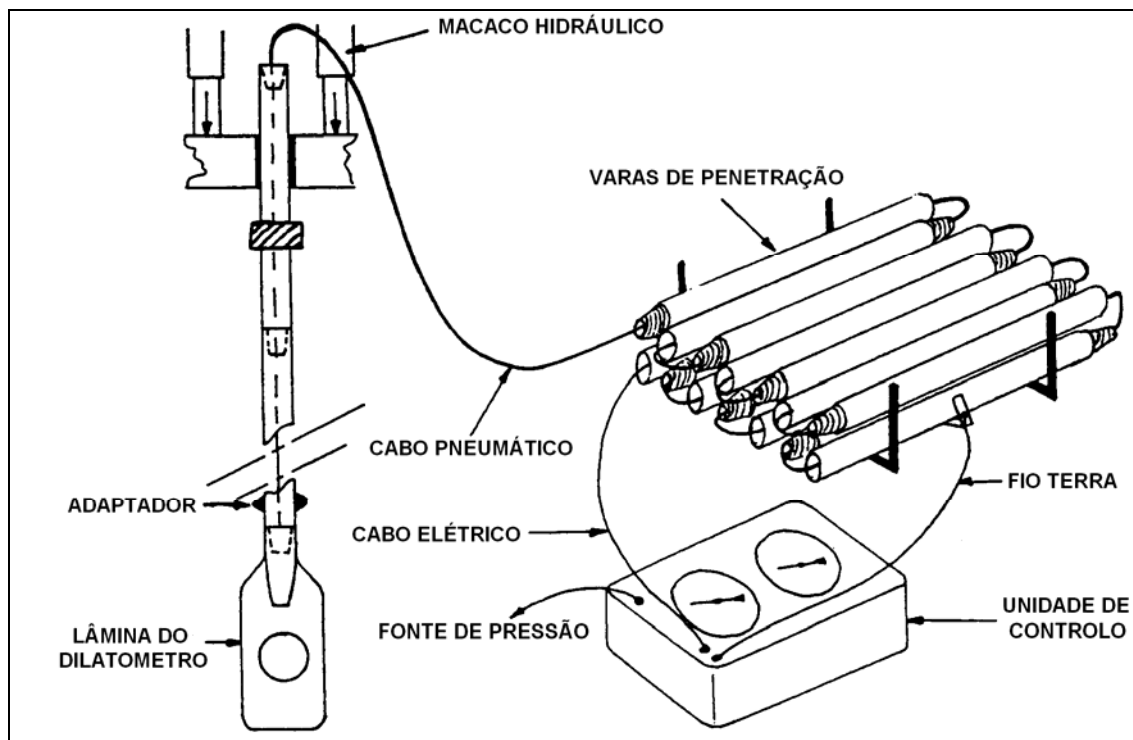


Figura 3.2 – Esquema da disposição e ligação das várias componentes do ensaio DMT (Marchetti et al., 2001).

3.3. EXECUÇÃO DO ENSAIO

O ensaio consiste na cravação de uma lâmina (Figura 3.3), de 20 em 20 cm de profundidade. Em cada intervalo de profundidade a cravação é interrompida e é realizada a expansão da membrana de aço flexível com auxílio de um gás pressurizado, para obtenção das seguintes leituras:

Leitura A: após o operador abrir a válvula do gás pressurizado a buzina e o galvanómetro são automaticamente accionados, a leitura A é registada quando o sinal audio é desactivado, o que corresponde ao momento em que a membrana deixa de contactar o disco sensor onde se encontrava alojada (início do movimento da membrana). Este movimento tem um deslocamento de 0.05 mm (+0.02 – 0.00mm).

Leitura B: quando o centro da membrana se desloca 1.10 mm (± 0.03 mm), o circuito é fechado, a buzina e o galvanómetro são activados, e a leitura B é registada;

Leitura C: foi introduzida mais tarde por Campanella et al. em 1985, e é registada na fase de descarga (após a leitura B) quando a membrana recontacta com o disco sensor, ou seja, quando volta a atingir uma expansão de 0.05mm.

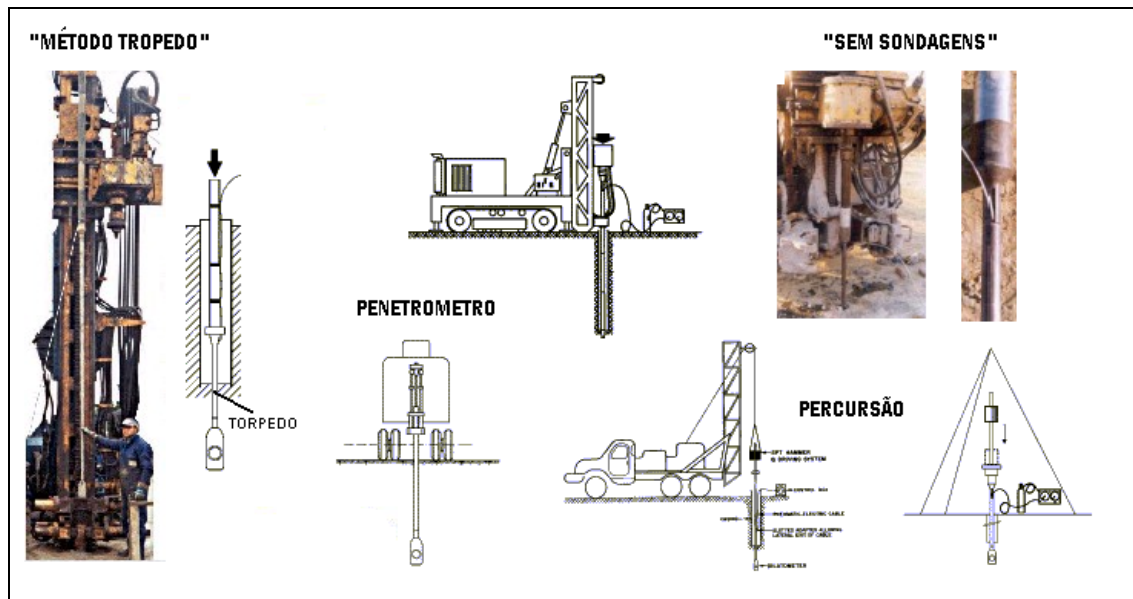


Figura 3.3 – Vários métodos de execução do ensaio DMT (adaptado de Marchetti Site).

A Figura 3.4 mostra, esquematicamente, a sequência das leituras, acima indicadas, e a activação e desactivação do sistema de áudio.

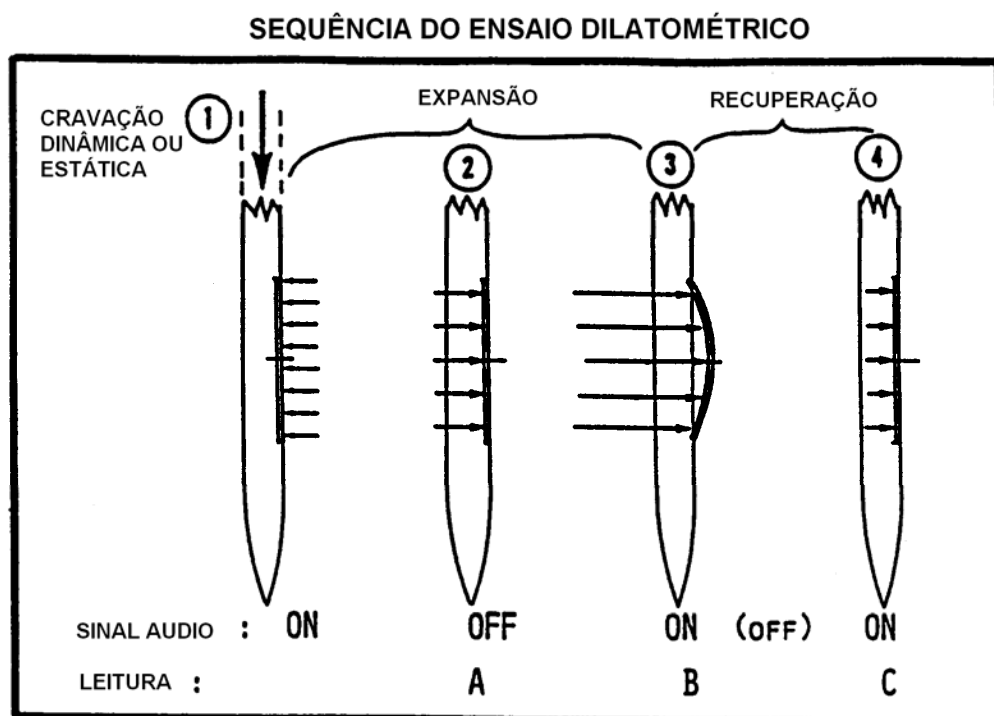


Figura 3.4 – Sequência do procedimento de leitura e sinal áudio, do ensaio DMT (adaptado de Marchetti et al., 2001).

Para efeitos de calibração da rigidez da membrana são registadas no início e no fim de cada ensaio as leituras ΔA e ΔB . Estas duas leituras, correspondem às situações A e B no vazio, e os seus valores variam entre 0.05 a 0.30 bar e 0.05 a 0.80 bar, respectivamente. A diferença entre estas duas leituras deve ser superior a 0.25 bar, antes e depois do ensaio. Caso não se verifique esta grandeza, o ensaio terá que ser repetido (Eurocódigo 7, 1997).

3.4. PERTURBAÇÃO INTRODUZIDA PELO EQUIPAMENTO

Os ensaios “in situ”, na generalidade, têm evoluído no sentido de diminuir a perturbação causada pela penetração do aparelho no solo. A introdução de qualquer tipo de dispositivo no solo provoca um deslocamento das partículas, e consequentemente induz na alteração do campo de tensões, na vizinhança deste. A magnitude destas deformações é razão directa da geometria do equipamento de penetração e deve ser tida em consideração quando da determinação dos vários parâmetros geotécnicos, nomeadamente estado de tensão “in situ” e módulos de deformabilidade.

3.4.1. DEFORMAÇÃO PROVOCADA PELA INSERÇÃO DO DMT

A principal fonte de erros está relacionada com a penetração da lâmina do dilatómetro no solo. Esta penetração engloba também, erros provenientes da eventual não verticalidade da lâmina, durante a cravação, do tempo que medeia entre a cravação e a expansão da membrana e da assumpção da pressão da água como hidrostática (Cruz, 1995).

Marchetti (1980) cita: “A penetração da lâmina do dilatómetro causa um deslocamento horizontal das partículas do solo, no eixo vertical, de 7mm (metade da espessura do dilatómetro), um deslocamento consideravelmente abaixo, comparando com o que é induzido pelo ensaio CPTU (18mm para Cone Penetration Test, CPT), frequentemente usado.”

Na Figura 3.5, que está de acordo com a solução teórica de Baligh, evidenciam-se as diferentes deformações causadas por elementos com ângulos de apicais de 20° (ângulo do dilatómetro) e 60° (ângulos típicos dos cones).

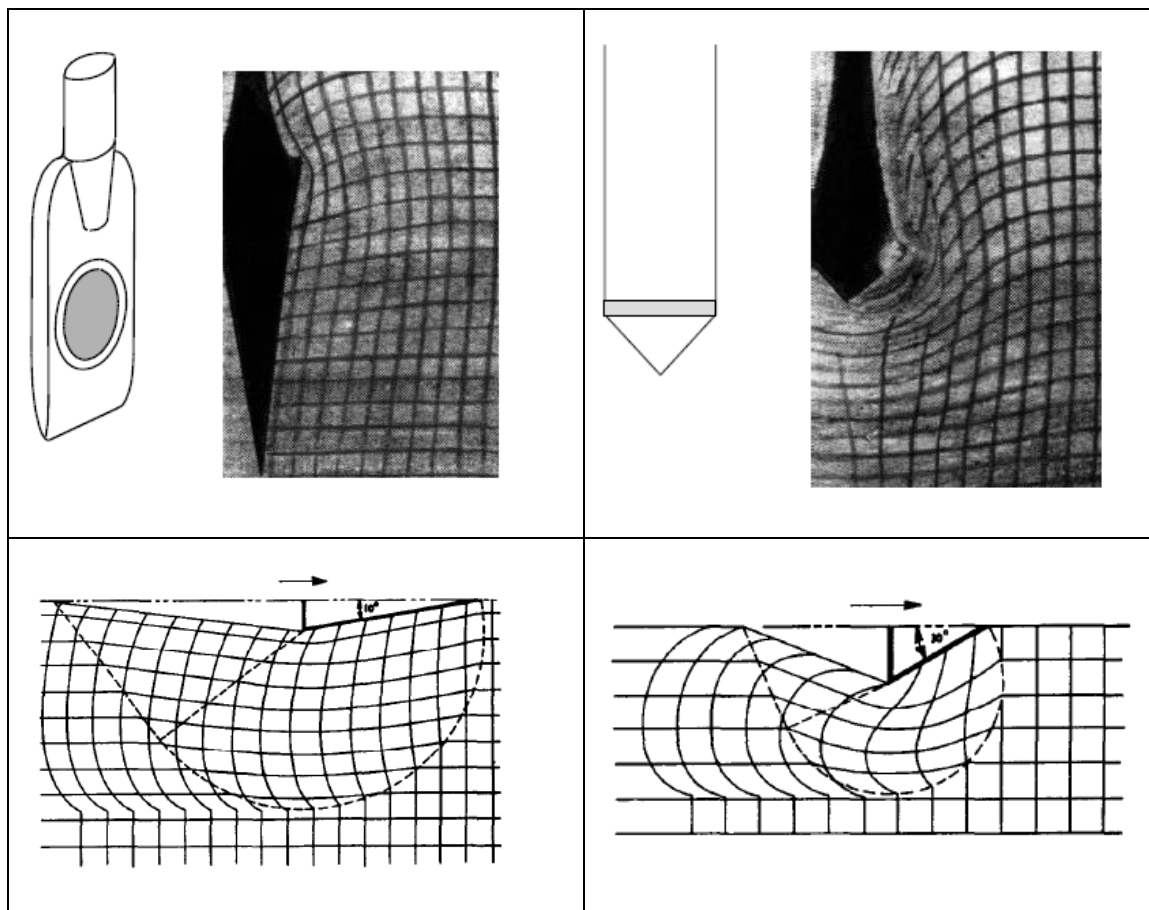


Figura 3.5 – Deformações causadas pela cravação do DMT e CPT (Marchetti, 1980).

Pela análise da figura, é possível verificar que a concentração de deformações de corte se encontra preferencialmente junto às arestas, e que estas deformações são inferiores em elementos que exibem menor ângulo de abertura (Cruz, 1995). Sendo assim, e visto que a lâmina do dilatómetro tem um ângulo de abertura menor, em relação aos ensaios de penetração mais comuns, as perturbações induzidas no solo são abaixo da média. Outra vantagem associada à forma da lâmina dilatométrica é o facto de as pressões serem determinadas na face lateral, onde a concentração de deformações é menor.

3.5. PARÂMETROS E CORRELAÇÕES DO ENSAIO

3.5.1. PARÂMETROS DO ENSAIO

As leituras A, B e C são corrigidas (correção da rigidez da membrana), usando as leituras ΔA e ΔB , gerando as pressões de ensaio P_0 , P_1 e P_2 (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 - Pressões corrigidas

Símb.	Designação	Expressão numérica
P_0	Pressão inicial de expansão	$P_0 = 1.05 \times (A + \Delta A) - 0.05 \times (B - \Delta B)$ (3.1)
P_1	Pressão final de expansão	$P_1 = B - \Delta B$ (3.2)
P_2	Pressão inicial na descarga	$P_2 = C - \Delta A$ (3.3)

P_0 é a pressão inicial, equivale à correção da leitura A (isto é, a 0,05mm de expansão), P_1 é a pressão corrigida correspondente a um deslocamento de 1,10mm e P_2 é referente à pressão em descarga ao deslocamento inicial de 0,05mm.

Cruz (1995) evidencia que a pressão P_0 é correlacionável com a tensão horizontal “in situ”, e a pressão P_2 parece fornecer indicações sobre a pressão da água nos poros em solos arenosos e o excesso de pressão neutra causado pela cravação da lâmina em solos de granulometria fina.

Uma vez determinado P_0 e P_1 , a sua diferença, $\Delta P = P_1 - P_0$, pode ser calculada. O valor de ΔP pode ser convertido em módulos de elasticidade do solo (módulos de Young, E, e módulo de deformabilidade confinado, M) usando a teoria da elasticidade, conforme indicado em seguida.

A partir das pressões corrigidas e do cálculo da tensão vertical efectiva ($\sigma'_v = \sigma_v - u$)¹, derivam-se quatro parâmetros intermédios característicos do ensaio:

E_D – Módulo Dilatométrico: relacionado com a deformabilidade do solo (Marchetti, 1980);

I_D – Índice de Material: relacionado com o tipo de solo (Marchetti, 1980);

K_D – Índice de Tensão Horizontal: relacionado com a razão de sobreconsolidação do solo, OCR (Marchetti, 1980);

U_D – Índice de tensão neutra: relacionado com a pressão intersticial (Lutnegger & Kabir, 1988).

3.5.1.1. MÓDULO DILATOMÉTRICO, E_D

O Módulo dilatométrico é obtido a partir da teoria da elasticidade e da diferença de pressões, ΔP . Resumidamente o módulo de elasticidade do solo, E_D , pressupõem que o espaço envolvente da lâmina forma dois semi-espacos elásticos em contacto através do plano de simetria da lâmina. Estes dois semi-espacos são caracterizados por um módulo de elasticidade, E , e um coeficiente de Poisson, ν , sujeito a condições de assentamento externo nulo, e pode ser traduzido por (Gravesen, 1960):

$$S_0 = (2D \Delta P / \pi) \times (1 - \nu^2) / E \quad (3.4)$$

em que,

S_0 – deslocamento na direcção normal ao plano da membrana, igual a 1.1mm no DMT;

D – diâmetro da membrana, igual a 60mm no DMT;

ΔP – Diferença entre as pressões P_1 e P_0 .

¹ $\sigma'_v = \sigma_v - u$: onde σ_v é a tensão vertical total, calculada a partir de $\sigma_v = (\gamma \times z) + u$, onde γ é peso específico da camada, z é a profundidade da camada e u corresponde à tensão neutra. A expressão que define a tensão neutra é a seguinte: $u = \gamma_w \times z_u$, onde γ_w é o peso específico da água e z_u é a altura da coluna de água.

Resolvendo para os valores dados,

$$E/(1 - \nu^2) = 34.7 \Delta P \quad (3.5)$$

O termo é denominado módulo dilatométrico, E_D :

$$E_D = 34.7 \times \Delta P = 34.7 \times (P_1 - P_0) \quad (3.6)$$

3.5.1.2. ÍNDICE DE MATERIAL, I_D

I_D , está relacionado com o tipo de solo, e, em geral, o seu valor varia entre 0.1 e 10, sendo obtido através da diferença da pressão de expansão da membrana, ΔP , em função da pressão inicial, P_0 , corrigida da pressão hidrostática, conforme a expressão seguinte (Marchetti, 1980):

$$I_D = \frac{\Delta P}{(P_0 - u_0)} = \frac{(P_s - P_0)}{(P_0 - u_0)} \quad (3.7)$$

onde u_0 é designada por tensão neutra, ou pressão de água nos poros.

3.5.1.3. ÍNDICE DE TENSÃO HORIZONTAL, K_D

O Índice de tensão horizontal, K_D , está relacionado com o grau de sobreconsolidação, OCR, e com o estado de tensão “in situ”. É obtido através da relação entre a pressão inicial, P_0 , corrigida da pressão hidrostática, e a tensão efectiva vertical, σ'_v , tendo como representação matemática a seguinte expressão (Marchetti, 1980):

$$K_D = \frac{(P_0 - u_0)}{\sigma'_v} \quad (3.8)$$

3.5.1.4. ÍNDICE DE TENSÃO NEUTRA, U_D

U_D reflecte as condições hidrostáticas do terreno, e relaciona a pressão P_2 com a pressão inicial, P_0 , ambas corrigidas da pressão hidrostática. O seu cálculo pode ser traduzido do seguinte modo (Lutnegger & Kabir, 1988):

$$U_D = \frac{(P_2 - u_2)}{(P_0 - u_0)} \quad (3.9)$$

De seguida será clarificada a utilização da pressão inicial, P_0 , corrigida da pressão hidrostática, nas equações 3.7, 3.8 e 3.9.

Considerem-se dois terrenos de solo submersos (idênticos, excepto na profundidade do nível freático) a profundidades idênticas. Abaixo do nível freático, a diferença $P_0 - u_0$ para ambos os depósitos é a mesma, enquanto que o valor de P_0 será diferente (Marchetti, 1980). A Figura 3.6 ilustra a situação descrita.

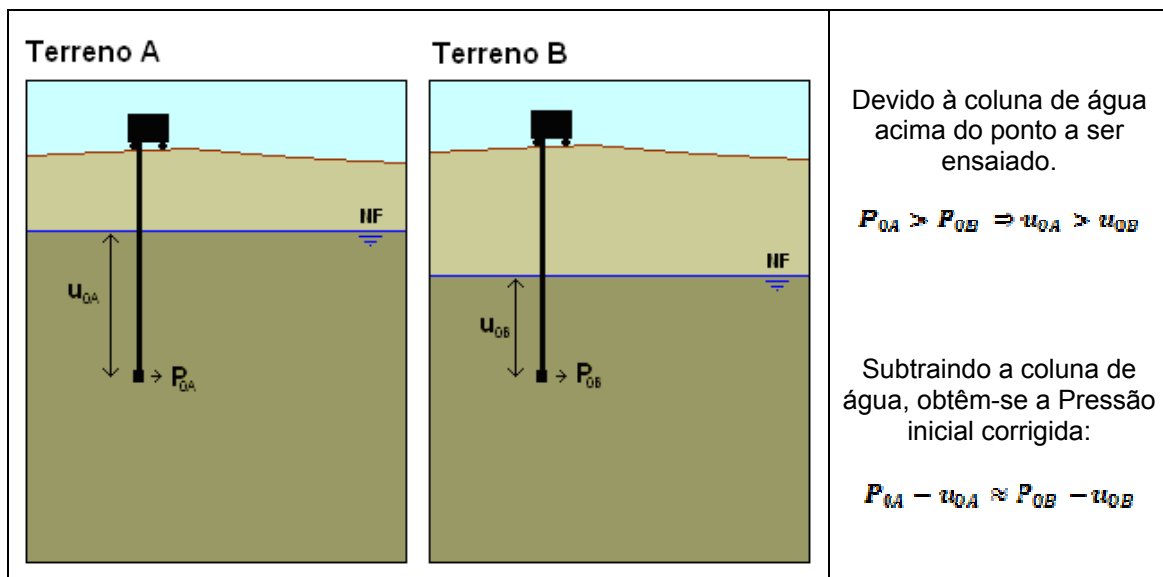


Figura 3.6 – Esquema ilustrativo necessidade de rectificação da pressão inicial, P_0 (subtração da pressão hidrostática).

3.5.2. PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Partindo dos parâmetros de ensaio, E_D , I_D e K_D , definidos nos subcapítulos anteriores, desenvolveram-se várias correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos relacionados com o estado de tensão, história de tensões, resistência e deformabilidade.

Para além dos parâmetros de ensaio, é necessário ter o conhecimento do nível freático, à data da realização do ensaio, para que seja possível determinar os seguintes parâmetros geotécnicos:

- Identificação do Tipo de Solo;
- Baridade total do solo;
- Coeficiente de impulso em repouso, K_0 ;
- Grau de consolidação, OCR.
- Coesão não drenada, c_u
- Ângulo de atrito efectivo, em solos arenosos, ϕ ;
- Módulo de Elasticidade, E ;
- Módulo de deformabilidade confinado, M ;
- Módulo distorsional, G_0 .

3.5.2.1. IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS

Tipo de solo

Através do parâmetro de ensaio I_D , obtêm-se a caracterização do solo (estratigrafia). Normalmente, o Índice de Material varia de 0.1 a 10, e este intervalo foi subdividido por Marchetti, fruto de conclusões obtidas através do conjunto de ensaios efectuados (Marchetti, 1980). A seguir estão tabelados os sub-intervalos e referenciados os tipos de solo correspondentes, ou seja, sua classificação:

Quadro 3.2 – Classificação de solos segundo o valor de I_D .

Sub-Intervalo	Classificação
$I_D > 3.30$	solos arenosos
$1.80 < I_D \leq 3.30$	solos areno.siltosos
$1.20 < I_D \leq 1.80$	solos silto-arenosos
$0.90 < I_D \leq 1.20$	solos siltosos
$0.60 < I_D \leq 0.90$	solos siltos-argilosos
$0.35 < I_D \leq 0.60$	solos argilo-siltosos
$0.10 < I_D \leq 0.35$	solos argilosos
$I_D \leq 0.10$	argilas sensíveis

Baridade total ou solo Peso volúmico do Solo

Marchetti e Crapps (1981) desenvolveram um ábaco (Figura 3.7), que permite uma estimativa da baridade total do solo (Peso volúmico do Solo) com base em I_D e E_D (Índices do Dilatômetro).

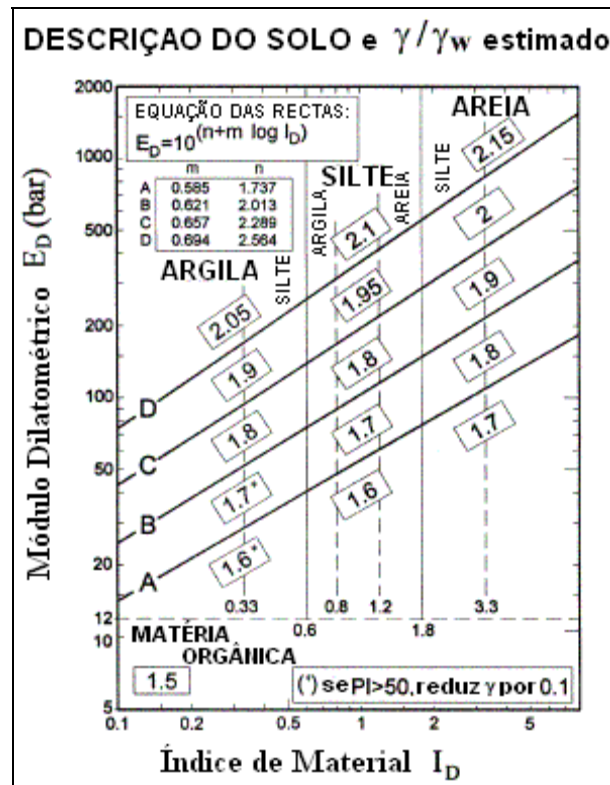


Figura 3.7 - Diagrama para obtenção da baridade (Marchetti & Crapps, 1981).

3.5.2.2. ESTADO DE TENSÃO “IN SITU”

Coeficiente de impulso em repouso, K_0

Marchetti (1980) correlacionou, inicialmente, o coeficiente de impulso em repouso com K_D , tendo em conta que o mesmo é influenciado por outros factores, para além de σ'_h , tais como:

- Cimentação e envelhecimento;
- Ciclos de tensão a que o solo esteve sujeito, independentemente do incremento de σ'_h ;
- Densidade relativa em solos arenosos;
- Vibrações, em solos arenosos; sobreconsolidação natural resultante da remoção superficial.

Para solos de natureza argilosa, Marchetti (1980) desenvolveu a seguinte correlação:

$$K_0 = (K_D/1.5)^{0.47} - 0.6 \quad (3.10)$$

Indicando as seguintes condições de validade:

- $K_0 > 0.3$;
- Solos não sujeitos a fenómenos de cimentação, envelhecimento ou endurecimento tixotrópico, e cujo grau de sobreconsolidação se deva apenas a remoção superficial.

Quando a segunda condição não é respeitada, K_D reflectirá na combinação de efeitos causados por qualquer outro fenómeno, para além de σ'_h .

Em 1988, Powell e Uglow sugeriram uma divisão entre argilas recentes (idade inferior a 60 mil anos) e argilas envelhecidas (idade superior a 70 milhões de anos), baseando-se em ensaios SBT e DMT, realizados em solos argilosos, brandos a médios e sobreconsolidados, no Reino Unido. Assim para as argilas recentes formularam a seguinte correlação:

$$K_0 = 0.34K_D^{0.55} \quad (3.11)$$

Lacasse e Lunne (1988), com base em ensaios realizados em 10 locais diferentes na Noruega, obtiveram resultados idênticos, e afirmaram ser necessário estabelecer correlações locais, para argilas envelhecidas, sugerindo a determinação de 2 ou 3 valores, pelos quais se traçará uma recta paralela á linha de Marchetti.

Lunne et al. (1990) propõem:

$$K_0 = 0.34K_D^{0.54} \quad \text{se } c_u / \sigma'_v \leq 0.8 \quad (3.12)$$

$$K_0 = 0.68K_D^{0.54} \quad \text{se } c_u / \sigma'_v > 0.8 \quad (3.13)$$

Nos solos arenosos, K_D é controlado pela tensão efectiva horizontal (σ'_h) e pela densidade relativa, o que indica que será necessário separar os efeitos causados por estes dois factores (Jamiolkowski, 1979; Marchetti, 1980; Campanella e Robertson, 1983). Ensaio em câmaras de calibração, CC, realizados entre 1980 e 1983, demonstraram a necessidade de introduzir, na correlação K_0/K_D , a densidade relativa ou o ângulo de atrito, ϕ' , uma vez que os dois se encontram intimamente relacionados.

Schmertmann (1983), baseado em ensaios CC, propôs um método para avaliar K_0 em função de K_D e do ângulo de atrito, ϕ' , com validade em solos de $I_D > 1.2$, ou seja, solos arenosos.

O método consiste, essencialmente, no seguinte:

1. Obtenção de K_D através do ensaio DMT;
2. Determinação da resistência de ponta obtida do ensaio CPT, q_c , à mesma profundidade;
3. Assumir um valor de K_0 ;
4. Estimativa do valor do ângulo de atrito para a situação de deformação plana, ϕ_{ps} , de acordo com as teorias de Dungunoglu e Mitchell (1975), segundo a Figura 3.8;
5. Cálculo do ângulo de atrito para condições de simetria axial, ϕ_{ax} , pelas seguintes expressões:

$$\phi_{ax} = \phi_{ps} - \frac{1}{3}(\phi_{ps} - 32), \quad \text{se } \phi_{ps} > 32^\circ \quad (3.14)$$

$$\phi_{ax} = \phi_{ps}, \quad \text{se } \phi_{ps} < 32^\circ \quad (3.15)$$

6. Cálculo de K_0 através de :

$$K_0 = \frac{(40 + 23K_D - 86K_D(1 - \sin \phi_{ax}) + 152(1 - \sin \phi_{ax}) - 717(1 - \sin \phi_{ax})^2)}{192 - 717(1 - \sin \phi_{ax})} \quad (3.16)$$

7. Comparação do valor de K_0 assim determinado com aquele outro assumido em 3.; caso os valores se afastem em percentagem superior a 10%, iterar até que a variação dos dois caia dentro da margem referida.

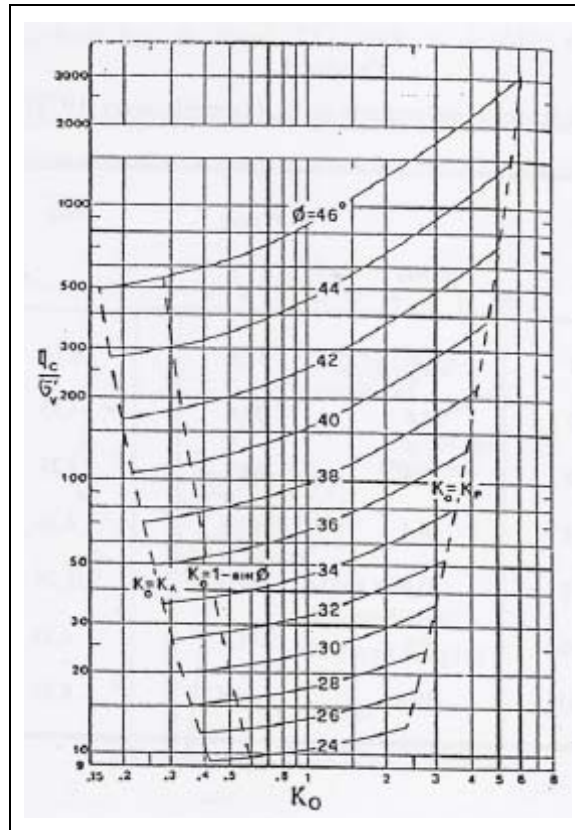


Figura 3.8 - Diagrama para determinação de ϕ' com base nas teorias de Durgonuglu e Mitchell (Marchetti, 1997).

Baseado em ensaios CC efectuados sobre solos arenosos, Baldi (1986), sugeriu que K_0 fosse determinado com base em K_D e q_c , obtido do CPT, através da seguinte equação:

$$K_0 = C_1 + C_2 \cdot K_D - C_3 \cdot q_c / \sigma'_v \quad (3.17)$$

onde:

$$C_1 = 0.376, C_2 = 0.095, C_3 = -0.00172$$

q_c representa a resistência típica de CPT e σ'_v tensão efectiva vertical, que pode ser obtida a partir dos resultados do DMT.

Por seu lado, em solos residuais de natureza granítica, Cruz et al. (2004, 2006) propõem a avaliação do coeficiente de impulso de repouso considerando que a presença da estrutura de cimentação é reflectida pelo valor $(q_c/\sigma'_v)/K_D$ significativamente diferente de 33. O segundo termo da equação sugerida por Baldi (1986) é modificado segundo Cruz et al. (1997) e Viana da Fonseca et al. (2001), assumindo a seguinte expressão:

$$C_2 = 0.095 \times [(q_c/\sigma'_v)/K_D]/33 \quad (3.18)$$

3.5.2.3. GRAU DE SOBRECONSOLIDAÇÃO, OCR

Inicialmente, o grau de sobreconsolidação foi correlacionado por Marchetti (1980), com base em ensaios edométricos, através da seguinte expressão:

$$OCR = (0.5 \times K_D)^{1.56} \quad (3.19)$$

Esta correlação foi restringida, por Marchetti, para solos com I_D compreendido entre 0.2 e 2.0, nomeadamente solos com história de tensões simples e que não tenham sido sujeitos a fenómenos de envelhecimento, cimentação ou endurecimento tixotrópico os quais, a acontecerem, conduzem a valores claramente sobrestimados.

Por outro lado, Marchetti e Crapps (1981) apresentam a seguinte correlação, todo o tipo de solo. As correlações são válidas para valores de OCR superiores a 0.8.

$$- \quad I_D \leq 1.2 \quad \quad \quad OCR = (0.5 \times K_D)^{1.56} \quad (3.20)$$

$$- \quad I_D \geq 2.0 \quad \quad \quad OCR = (0.67 \times K_D)^{1.91} \quad (3.21)$$

$$- \quad 1.2 < I_D < 2.0$$

$$OCR = \left(\left(0.5 + 0.17 \times \left(\frac{I_D - 1.2}{0.8} \right) \right) \times K_D \right)^{1.56 + 0.35 \times \left(\frac{I_D - 1.2}{0.8} \right)} \quad (3.22)$$

Em 1989, Powell e Uglow, no mesmo estudo da dedução do coeficiente de impulso em repouso, comparam os valores de OCR obtidos de ensaios de consolidação, estabelecendo a mesma diferenciação dos solos, resultando para argilas jovens:

$$OCR = 0.24 K_D^{1.32} \quad (3.23)$$

Para as argilas maduras o processo é idêntico ao seguido para a determinação de K_0 .

Adaptando da relação de K_0 -OCR de Mayne e Kulhawy (1982), Schmertmann (1988), propõem para solos arenosos, com $I_D > 1.2$, não afectados por fenómenos de envelhecimento e/ou cimentação, a seguinte expressão, com um grau de incerteza inferior a 16%:

$$OCR = \left(K_0 / 1 - \text{sen} \phi_{ax} \right)^{1/0.8 \text{sen} \phi_{ax}} \quad (3.24)$$

Por seu lado, Lunne et al (1989) sugerem, para solos argilosos, as seguintes correlações, com um grau de incerteza inferior a 30%:

$$OCR = 1.3 K_D^{1.17}, \quad \text{se } c_u / \sigma'_v \leq 0.8 \quad (3.25)$$

$$OCR = 2.7 K_D^{1.17}, \quad \text{se } c_u / \sigma'_v > 0.8 \quad (3.26)$$

3.5.2.4. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Coesão não drenada, c_u

Marchetti (1980) combinou a equação apresentado por Ladd et al. (1977),

$$(c_u/\sigma_v')_{oc} = (c_u/\sigma_v')_{nc} OCR^m, \quad \text{com } m=0.8 \quad (3.27)$$

e a equação equivalente à correlação de OCR / K_D , obtendo assim:

$$(c_u/\sigma_v')_{oc} = (c_u/\sigma_v')_{nc} (0.5K_D)^{1.25} \quad (3.28)$$

Nota: o cálculo deste parâmetro só é viável em solos de granulometria fina, ou seja, com $I_D < 1.2$.

Por outro lado, considerou válida a sugestão de Mesri (1975):

$$(c_u/\sigma_v')_{nc} = 0.22 \quad (3.29)$$

e obteve a equação actualmente utilizada:

$$(c_u/\sigma_v')_{nc} = 0.22(0.5K_D)^{1.25} \quad (3.30)$$

Posteriormente, Lacasse e Lunne (1988) procuraram estabelecer relações entre K_D e c_u que fossem dependentes do ensaio utilizado para determinar a resistência não drenada. Foram assim, sugeridas correlações, adaptadas da correlação de Marchetti, para a resistência não drenada corrigida do ensaio de molinete e resistências obtidas dos ensaios de corte simples e compressão triaxial.

$$\text{Molinete} - c_u/\sigma_v' = (0.17 \text{ a } 0.21)(0.5K_D)^{1.25} \quad (3.31)$$

$$\text{Corte Simples} - c_u/\sigma_v' = 0.20(0.5K_D)^{1.25} \quad (3.32)$$

$$\text{Comp. Triaxial} - c_u/\sigma_v' = 0.14(0.5K_D)^{1.25} \quad (3.33)$$

A escolha da correlação a utilizar deve estar de acordo com a trajectória de tensões predominante no problema em análise.

Roque et al. (1988), com base num trabalho sobre as argilas de Glava (Noruega), com ensaios de compressão triaxial, sugerem a utilização das fórmulas clássicas de capacidade de carga:

$$c_u = (P_1 - \sigma_{ho})/N_c \quad (3.34)$$

em que σ_{ho} representa a tensão total horizontal e é calculada a partir de K_0 obtido do DMT, e N_c é um factor que depende da fragilidade e plasticidade de solo, igual a 5 para argilas frágeis, 7 para argilas médias e 9 para argilas plásticas.

Ângulo de atrito, ϕ

A primeira correlação, mesmo que em fase experimental, para avaliação da resistência ao corte foi apresentada em Flat Dilatometer Manual (Marchetti e Crapps, 1981). A correlação é obtida com base nos valores de I_D e E_D , e só é aplicada para solos com valores superiores a 1.2 de I_D .

$$\phi = 25 + 0.19\sqrt{P - 100} \quad (3.35)$$

em que,

$$P = I_D R_c$$

$$R_c = 500 + (R - 500)/1 + (R - 500/1500) \quad \text{se } R > 500 \text{ e } \sigma'_v < 0.5\text{bar}$$

$$R_c = R \quad \text{se } R \leq 500 \text{ ou } \sigma'_v \geq 0.5\text{bar}$$

$$R = E_D/\sigma'_v$$

Schmertamnn (1983), baseando-se nas teorias de Durgunoglu e Mitchell (1975), apresentou um método para avaliar o ângulo de resistência ao corte em deformação plana, ϕ_{ps} , assumindo que o coeficiente de atrito entre a lâmina e o solo é igual a $\tan(\phi_{ps}/2)$. Tendo em conta que as teorias referidas aplicam-se à determinação do ângulo de atrito com base nos valores exibidos na rotura, e que é pouco provável que a rotura se verifique para um deslocamento de 1.1mm, o autor introduziu força de cravação da lâmina, argumentando que a mesma implica a rotura do solo.

$$\tan(\phi_{ax}/2) = \left[F - \left(\frac{\pi}{4} \right) \times D^2 \times u_0 \times 1.019 - \left(\frac{A + \pi d^2}{4 - Bd} \right) q_f + W(Z + 2) \right] / F_H \quad (3.36)$$

em que,

F – força de Cravação (Kg);

D – diâmetro das varas (cm);

u_0 – pressão da água antes da inserção da lâmina (Kg/cm²);

A – ara da carga do dilatómetro (cm²) (12.9 ou 14.4);

D – diâmetro do redutor de atrito (cm);

B – espessura da lâmina;

q_f – factor de capacidade de carga segundo Durgunoglu e Mitchell (Kg/m²);

W – peso das varas (Kg);

Z – profundidade de ensaio (m);

F_H – força horizontal normal à lâmina, igual a:

$$P_0 - u_0 \times \pi \times 1.019 \quad (\alpha \text{ assumido igual a } 355);$$

$$\text{para } q_f = \gamma_{av} \times B N_{\gamma q} / 10 \quad (3.37)$$

$$N_{\gamma q} = AB(C + DEF - GH + Gi) - J \quad (3.38)$$

em que,

$$A = \cos(\psi - \delta) / \cos \delta \quad (3.39)$$

$$B = \left(1 + \operatorname{sen} \phi_{ps} \operatorname{sen}(2\gamma - \phi_{ps})\right) / \cos \phi_{ps} \cos(\gamma - \phi_{ps}) \quad (3.40)$$

$$C = \cos^2(\gamma - \phi_{ps}) I\theta / 4 \cos^2 \psi \cos^2 \phi_{ps} \quad (3.41)$$

$$D = 3 \cos(\gamma - \phi_{ps}) / 4 \cos \psi \cos \phi_{ps} \quad (3.42)$$

$$E = e^{2\theta_0 \tan \phi_{ps}} \quad (3.43)$$

$$F = (m - 0.66m') \quad (3.44)$$

$$G = K \left[\cos \psi \cos \phi_{ps} / \cos(\gamma - \phi_{ps}) \right] \quad (3.45)$$

$$H = (m - m')^2 \times (m - 2m') \quad (3.46)$$

$$I = m^3 \quad (3.47)$$

$$J = \tan(\psi) / 4 \quad (3.48)$$

$$m = D/B \quad (3.49)$$

$$m' = \operatorname{sen} \beta \cos(\gamma - \phi_{ps}) \times e^{\theta_0 \tan \phi_{ps} / 2 \cos \psi \cos \phi_{ps}} \quad (3.50)$$

$$\tan \gamma = \left(\operatorname{sen} \phi_{ps} + \sqrt{1 + 2 \cos \phi_{ps}} \right) / (2 \cos \psi \cos \phi_{ps}) \quad (3.51)$$

$$\psi = 90 - \alpha \quad (3.52)$$

$$\theta_0 = 180 + (\psi + \gamma) + \beta \quad (3.53)$$

$$I\theta = \left\{ 3 \tan \phi_{ps} \left[e^{3 \tan \phi_{ps} \cos \beta - \cos(\theta_0 - \beta)} \right] + \left[e^{3 \tan \phi_{ps} \operatorname{sen} \beta - \operatorname{sen}(\theta_0 - \beta)} \right] \right\} / 1 + 9 \tan^2 \phi_{ps} \quad (3.54)$$

γ_{avg} - peso específico médio acima do ponto de ensaio;

$N_{\gamma g}$ - factor de capacidade de carga;

ψ - ângulo da lâmina;

α - metade do ângulo da base do dilatómetro;

β - ângulo com a vertical da tangente à superfície de rotura (assumido $=\phi'_{ps}$);

γ - ângulo do plano de corte (assumido $=\phi'_{ps}/2$);

δ - ângulo de atrito dilatómetro / solo (assumido $=\phi'_{ps}/2$);

m - relação profundidade / espessura da lâmina;

θ_0 - logaritmo do ângulo da superfície de rotura;

K - Coeficiente de impulso (assumido igual a K_0);

Para a resolução do sistema, Schmertmann (1983) propõe:

1. Estimar o valor ϕ'_{ps} ;
2. Resolver as equações de 3.49 e 3.54;
3. Calcular K_0 de acordo com a secção 3.5.2.2 - Coeficiente de Impulso em repouso;
4. Substituir os parâmetros calculados em b) e c) na equação 3.38;
5. Determinar γ_{avg} e resolver 3.37;
6. Calcular ϕ'_{ps} , a partir de 3.36; se a diferença entre os ângulos assumido e calculado for menor que zero então o valor assumido é baixo; caso contrário é alto;
7. Iterar até a diferença entre os ângulos assumido e calculado ser inferior a 1.

O ângulo drenado determinado em condições de deformação plana pode ser transformado em ângulo de resistência ao corte em condições de simetria axial, ϕ'_{ax} , do seguinte modo:

$$\phi'_{ps} < 32 \quad \phi'_{ax} = \phi'_{ps} \quad (3.55)$$

$$\phi'_{ps} > 32 \quad \phi'_{ax} = \phi'_{ps} - [(\phi'_{ps} - 32)/3] \quad (3.56)$$

Jamiolkowski et al. (1988) concluíram que este método é conservativo em cerca de 2° e que a diferença entre $\phi'_{ps}(\text{lab})$ e $\phi'_{ps}(\text{DMT})$ aumenta com a densidade.

Finalmente, Marchetti (1997) apresenta, para valores de I_D maior que 0.9, uma correlação, bastante mais simples, indicada em seguida:

$$\phi = 28 + 14.6 \times \log_{10}(K_D) - 2.1 \times (\log_{10}(K_D))^2 \quad (3.57)$$

Coesão efectiva e ângulo de resistência ao corte em solos residuais

O comportamento dos solos residuais é marcado pela presença de uma estrutura de cimentação, representada pelo desenvolvimento de coesão efectiva, c' , e ângulo de resistência ao corte, ϕ' , de acordo com o critério Mohr-Coulomb.

Cruz et al. (2004b) apresentam modelos de dedução da coesão efectiva em solos residuais com base nos ensaios DMT e CPT, designadamente a partir do índice de tensão horizontal, K_D , “grau de sobreconsolidação virtual”, $vOCR$ (DMT) e a razão entre os parâmetros M e q_c , respectivamente deduzidos a partir dos ensaios DMT e CPT.

De acordo com Marchetti (1980), os perfis do índice K_D seguem o formato clássico dos perfis OCR e preservam os padrões dos comportamentos típicos:

- a. Solos normalmente consolidados (NC) geralmente apresentam valores próximos de 2.
- b. Solos sobreconsolidados (OC) o índice K_D apresenta valores superiores a 2, e geralmente decrescem com a profundidade até atingir os valores de NC.
- c. Solos NC afectados por cimentação ou envelhecimento desenvolvem perfis de K_D estáveis com a profundidade e com valores superiores a 2.

Cruz et al. (2004) concluem que os valores de K_D reflectem claramente os efeitos de cimentação, visto que, os perfis correspondentes aos dados desses estudo apresentam uma tendência global de estabilização com a profundidade, evidenciando valores significativamente maiores que 2, normalmente dentro do intervalo de 5 a 15.

A aplicação do grau de sobreconsolidação tem como base, mesmo que este conceito não tenha o mesmo significado para solos sedimentares e residuais, a presença de estruturas naturalmente cimentadas. Cruz et al (2004b) definem a tensão de pré-consolidação (designada de virtual no caso dos solos residuais), considerando que não representa a máxima tensão a que já esteve sujeito, mas à quebra da cimentação “in situ”. Neste contexto a razão com a tensão vertical de repouso é designada “ grau de sobreconsolidação virtual” (vOCR).

Por outro lado, Cruz et al. (2004) sugerem ainda a possibilidade de utilização da relação M/q_c com base nas seguintes considerações:

- a. A relação M/q_c tende a desenvolver valores situados na fronteira NC/OC, (10 a 12, de acordo com Marchetti, 1997), frequentemente mostrando picos OC; parte destes picos estão relacionados com a redução de q_c , que pode ser devido a uma maior perturbação causada pela introdução do CPT.
- b. É evidente que M_{DMT} aumenta com a profundidade e como consequência a razão com q_c também aumenta;
- c. Os perfis de K_D são típicos de solos normalmente consolidados, mas os valores variam de 2 a 25; dado que a referência para solos sedimentares é de aproximadamente 2, isto revela a presença de solos cimentados, de acordo com as conclusões de Marchetti et al (1980);
- d. M/q_c nos solos estudados enquadram-se no intervalo 10-15 que corresponde à fronteira NC/OC (5-6)

Na Figura 3.9 apresentam-se as correlações de c' com os vários parâmetros de referência, conforme Cruz et al. (2004).

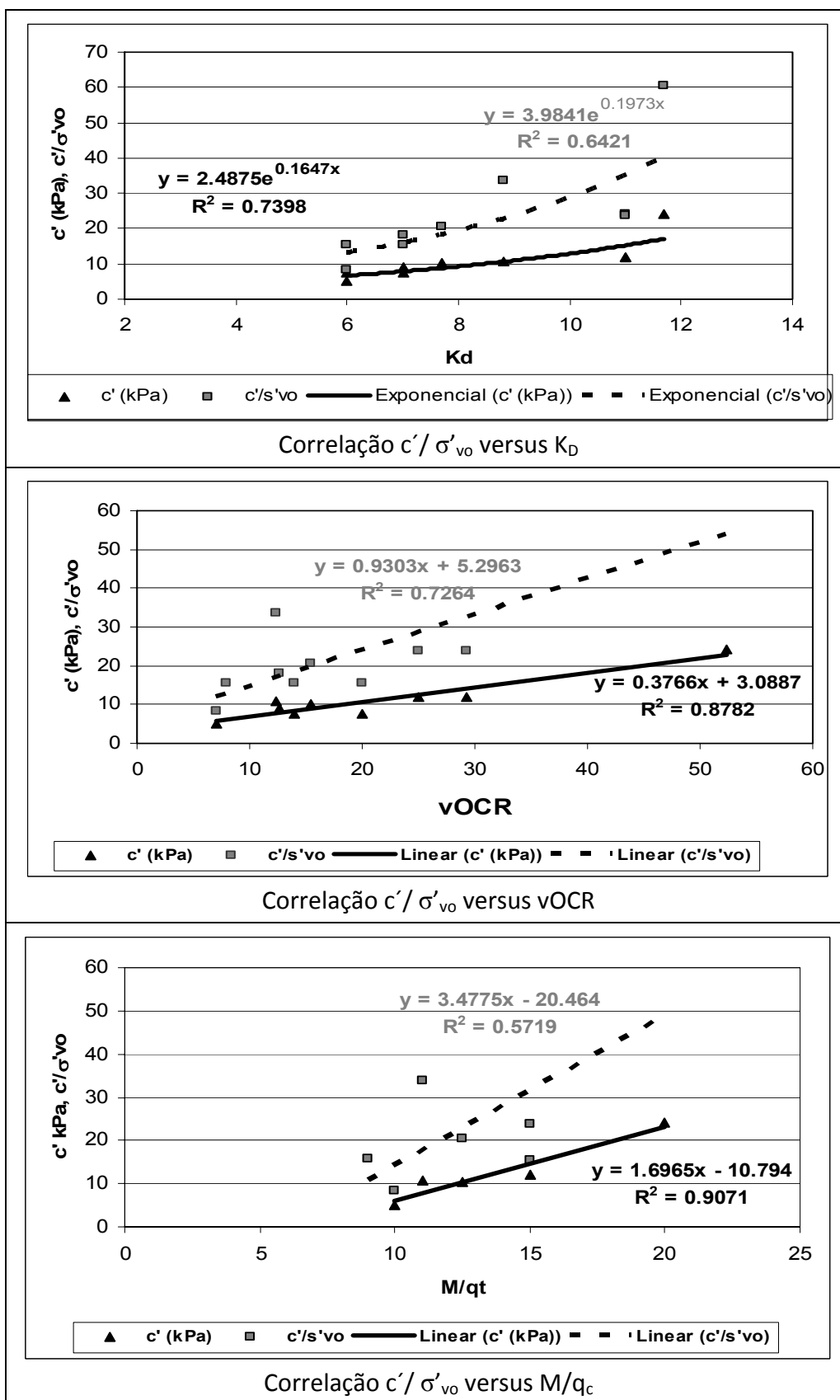


Figura 3.9 – Correlações para obtenção de c' (Cruz et al., 2004).

Como é possível verificar na Figura 3.9 a correlação mais correcta (com R^2 mais elevado) é baseada em OCR, conforme a Equação 3.58.

$$c' = 0.3766 \times OCR + 3.0887 \quad (3.58)$$

Cruz et al. (2006) introduziram ainda uma correcção do sobredimensionado ângulo de resistência ao corte, ϕ' , de acordo com a expressão seguinte:

$$\phi'_c = \phi_{DMT} - 0.1418 \times OCR + 1.1644 \quad (3.59)$$

3.5.2.5. PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE

A possibilidade de avaliar a deformabilidade do solo é uma das principais vantagens do ensaio. O facto de a deformabilidade ser medida na horizontal, sentido da expansibilidade da membrana da lâmina, minimiza a perturbação causada pela penetração da lâmina, sentido vertical.

Módulo de deformabilidade, M

O módulo M determinado pelo ensaio DMT, também designado por M_{DMT} , corresponde ao módulo vertical drenado tangente à pressão de confinamento, σ'_v , do ensaio, e é igual ao determinado pelo edómetro. Uma grande relevância deste parâmetro no ensaio, é o facto de ser possível estimar o módulo de confinamento tanto em solos coesivos como granulares.

Marchetti (1980) procurou estabelecer uma ligação entre E_D e o módulo de deformabilidade tangente confinado, com a seguinte definição:

$$M = \Delta\sigma'_v / \Delta\varepsilon_v \quad (3.60)$$

Marchetti (1980) considerou que M é um parâmetro que deve incluir a informação do tipo de solo (dado que é fornecido pelo ensaio através de I_D) e a respectiva história de tensões (conhecimento fornecido pelo ensaio através de K_D) para além do módulo dilatométrico (E_D).

Com base em dados experimentais, Marchetti (1980) apontou as seguintes particularidades:

- Não existe uma proporcionalidade única entre M e E_D , isto é, $R_m = M/E_D$ não é constante;
- O valor de R_m tende a aumentar com o incremento de K_D , parecendo desde logo importante a sua inclusão na correlação;
- Embora não tenha sido objectivo de estudo exaustivo, I_D parece não ter influência directa na correlação, salvo nos casos em que K_D apresenta valores muito reduzidos. Assim, os módulos de deformabilidade dos diferentes tipos de solo devem ser calculados segundo leis de variação similares;
- A correlação pode ser escrita do seguinte modo:

$$M = R_m E_D \quad (3.61)$$

$$R_m = 0.14 + 2.36 \ln K_D \quad \text{para } I_D \leq 0.6 \quad (3.62)$$

$$R_m = R_{m0} + (2.5 - R_{m0}) \ln K_D \quad \text{para } 0.6 < I_D < 3.0 \quad (3.63)$$

$$R_m = 0.5 + 2 \ln K_D \quad \text{para } I_D \geq 3.0 \quad (3.64)$$

$$R_m = 0.32 + 2.18 \ln K_D \quad \text{para } K_D \geq 10 \quad (3.65)$$

$$R_{m0} = 0.14 + 0.36(I_D - 0.6)/2.4 \quad \text{para } 0.6 < I_D < 3.0 \quad (3.66)$$

O valor mínimo admissível de R_m é 0.85, pelo que se o cálculo fornecer valores inferiores, deverá ser tomado $R_m=0.85$;

- Em solos arenosos exibindo cimentação, o formulário apresentado responde favoravelmente, o que parece reflectir a dependência de R_m em relação a K_D , independente da origem do mesmo;
- Os valores de M aplicam-se para pequenos incrementos de carga, até valores próximos da tensão de pré-consolidação, σ'_p . Para valores de incrementos superiores, o valor M subestima o comportamento real do solo.

As correlações de Marchetti (1980) foram testadas por Lacasse e Lunne (1982), Hayes (1983), Campanella e Robertson (1983), Aas et al. (1984), e verificaram que a mesma se aplica com grande razoabilidade em solo argilosos brandos a médios e em solos arenoso normalmente consolidados com predominância de minerais siliciosos.

Módulo de Distorsional, G_0

A avaliação do módulo Distorsional, G_0 , pode ser realizada segundo duas abordagens. A primeira baseia-se na aferição de um valor de G_0/E_D . Jamiolkwski (1985), Sully e Campanella (1989), Tanaka e Tanaka (1998) indicam valores fixos para esta relação. Cruz et al. (2006), baseando-se na informação obtida em solos Portugueses e incorporando os resultados dos autores mencionados propõem uma correlação em que se introduziu o parâmetro I_D , na forma de cálculo de G_0/E_D , validando-a para todo o tipo de solos.

$$G_0 = E_D \times 3.9366 \times (I_D^{-0.6117}) \quad (3.67)$$

Por outro lado, Hryciw (1990) exclui a correlação baseada em E_D mostrando que as correlações baseadas neste índice seriam afectadas pela elevada tensão de execução do ensaio com DMT comparando com o comportamento de pequena tensão. Assim, propôs um novo método, desenvolvido a partir do método indirecto de Hardin e Blandford (1989), para todos os tipos de solos, que substitui as variáveis σ'_0 e índice de vazios (e) por K_0 , γ e σ'_{v0} , todos obtidos através do DMT, formulando a seguinte expressão:

$$G_0 = \frac{\left(\left(\frac{530}{\sigma'_v} \right)^{0.25} \times \left(\frac{(\gamma-1)}{(2.7-\gamma)} \right) \times k_0^{0.25} \times \sigma_v'^{0.5} \right)}{10} \quad (3.68)$$

Capítulo 4. Precisão nas medições

4. PRECISÃO NAS MEDIÇÕES

4.1. INTRODUÇÃO

“As observações conduzidas pelo homem são caracterizadas pela inevitável presença dos erros de medição. Erros que não decorrem apenas de falhas humanas mas também, da imperfeição do equipamento e da influência das condições ambientais nas quais se processa a medição” (Gemael, 1984).

Como é referido por Gemael (1984), é inevitável a presença do erro no valor de uma medição. Mesmo na Física, que é considerada uma "ciência exacta", a utilização de instrumentos para medição de grandezas físicas, tem sempre um erro associado. Ou seja, as grandezas obtidas através de medições instrumentais são afectadas por um certo grau de inexactidão.

No entanto, é razoável admitir que o valor exacto existe e embora ele não seja conhecido, é possível estimar os limites do intervalo em que ele se encontra. O cálculo da incerteza associada a uma medição permite avaliar o grau de confiança nos resultados obtidos.

4.2. ESTIMATIVA DE ERROS

Estimar o erro associado à medição é conhecer o intervalo de variação da leitura. Segundo este pressuposto, na medição de uma grandeza não é esperado obter um valor exactamente igual ao verdadeiro, mas sim, um valor aproximado. É importante que seja dada a indicação sobre aproximação da medição ao valor verdadeiro, isto é, indicação da precisão ou do grau de confiança do valor medido. A sua apresentação inclui na leitura uma estimativa do seu erro. A título de exemplo, na medição de um comprimento podia-se obter o seguinte quadro:

Valor medido (mm)	Erro máximo do aparelho (mm)	Resultado Final (mm)	Intervalo de variação (mm)
200	2	200 ± 2	198 - 202

O conhecimento da ordem de grandeza do erro indica qual é o intervalo de variação (intervalo de incerteza ou intervalo de confiança) da leitura.

Na realização de uma medição directa com um aparelho provido de escala, comete-se um erro de leitura. Este erro existe porque a escala do aparelho tem como menor divisão um valor que não é tão pequeno quanto o que é necessário para efectuar uma leitura exacta. O erro de leitura num aparelho (na realidade é o erro máximo de leitura, mas que por simplificação denota-se apenas por erro de leitura) é dado pela sua menor graduação (menor escala que o operador consegue ler).

Num aparelho *digital*, que fornece resultados discretos separados de um determinado valor mínimo, define-se como o seu erro de leitura a separação atrás referida. Por exemplo, uma balança digital que forneça resultados até à décima do grama, não pode apresentar resultados que difiram menos de 0,1g. Um cronómetro também funciona por “saltos” (quer o mostrador seja analógico ou digital) e o erro de leitura será o valor do menor salto, geralmente 0,01s (Mendonça, 2000).

No caso de um aparelho *analógico*, este tem uma escala que pode ser lida de forma contínua. O erro de leitura é, vulgarmente, o valor da menor divisão da escala. Contudo, se o operador conseguir ler fracções da menor divisão da escala, então o erro de leitura é essa fracção. Por exemplo, usando uma régua onde a divisão mínima é 1mm, a leitura do número de milímetros de um dado comprimento tem associado um erro de 1mm. Mas se o operador se preocupar em interpolar distâncias que sejam uma fracção de milímetro, por exemplo 0,5mm, então o erro de leitura é 0,5mm. Neste último caso, os comprimentos medidos pelo observador vão até às décimas de milímetro, por exemplo (Mendonça, 2000):

Valor medido (mm)	Erro de leitura (mm)	Resultado Final (mm)	Intervalo de variação (mm)
21.5	0.5	21.5 ± 0.5	21 - 22
230.0	0.5	230.0 ± 0.5	229.5 – 230.5

Quando o fornecedor do aparelho de medida informa acerca do erro de fabrico do aparelho (relacionado com imperfeições dos componentes, procedimento de calibração, etc) este erro tem que ser adicionado ao erro de leitura.

Exemplo:

O fornecedor de réguas de 15cm no total, indica que a precisão de gravação da escala é de 0.25mm. Continuando com o exemplo anterior, o resultado da medição com o erro de fabrico é o seguinte:

Valor medido (mm)	Erro de leitura (mm)	Erro de fabrico (mm)	Resultado Final (mm)	Intervalo de variação (mm)
21.5	0.5	0.25	21.5 ± 0.75	20.75 – 22.25
230.0	0.5	0.25	230.0 ± 0.75	229.25 – 230.75

4.3. TIPO DE ERROS

Os erros de observação, normalmente, não obedecem a regras simples e podem ter várias causas. Geralmente, os erros estão ligados a três motivos distintos, referidos por Mendonça (2000):

- Equipamento
- Influência das condições ambientais;
- Factor humano.

Na maioria dos casos, todo o tipo de medições está associado a pelo menos um tipo de erro, e estes podem ser classificados em:

- Grosseiros,
- Sistemáticos,
- Acidentais,
- Outros.

Por vezes os tipos de erro ocorrem combinados, sendo difícil a sua distinção.

4.3.1. ERROS GROSSEIROS

Os erros grosseiros podem ser provocados por falhas ocasionais e/ou anormais dos instrumentos, do observador ou de outros parâmetros intervenientes. Normalmente são facilmente detectáveis, quer porque produzem medições substancialmente fora do esperado, ou por identificação da causa do erro, quando da execução da medição ou na análise dos resultados.

Este tipo de erro é muito frequente porque normalmente está associado á inépcia ou distracção dos operadores do equipamento ou operadores do computador, por exemplo:

- Iluminação inadequada

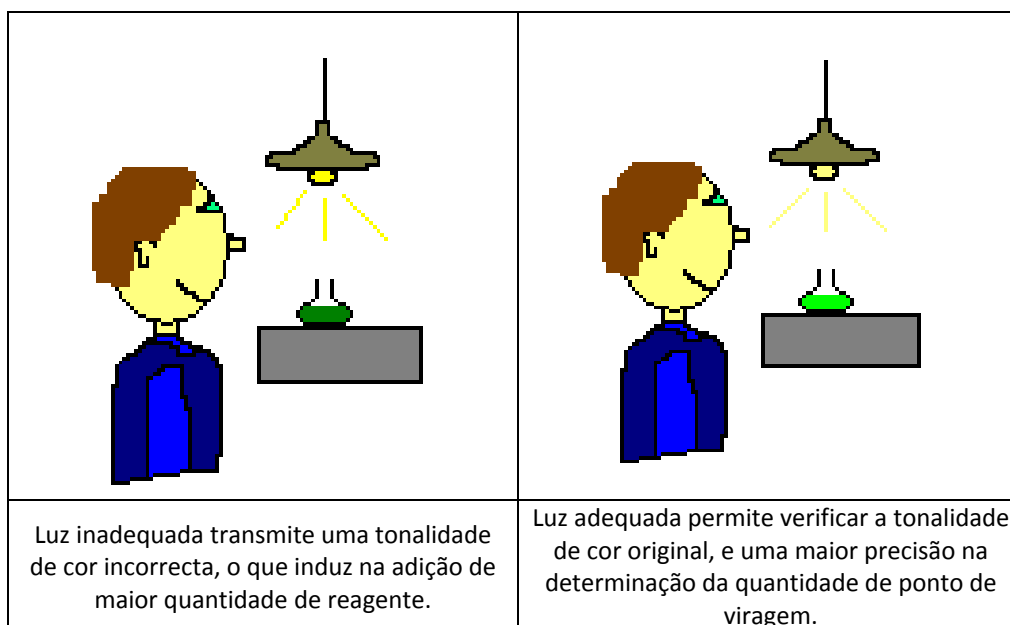


Figura 4.1 - Ilustração da consequência de luz inadequada aquando da observação de tonalidades.

- Registo incorrecto

É possível, e até frequente, que o registo de valores possa não ter sido correcto, por uma breve distracção do observador, ou seja, é anotado um valor diferente (Figura 4.2).

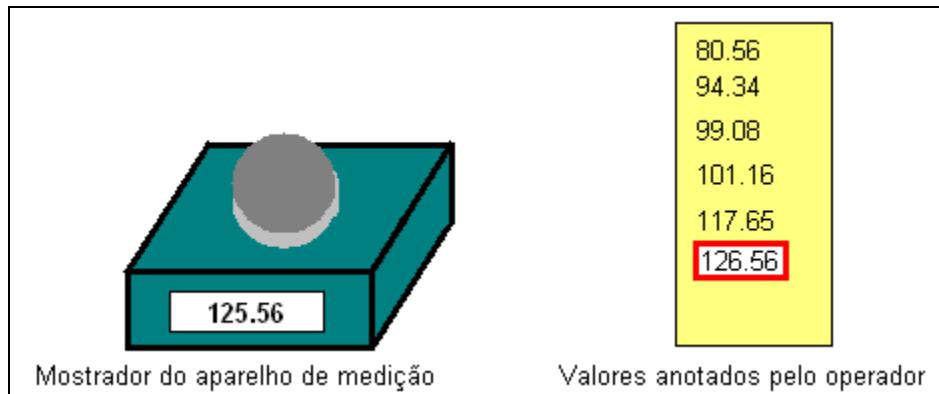


Figura 4.2 – Ilustração de registo incorrecto.

- Entrada irregular de dados no computador

Como no registo das leituras, a passagem deste para o computador pode ser acompanhada de erros, provenientes de desatenção e consequente introdução valores errados (Figura 4.3).

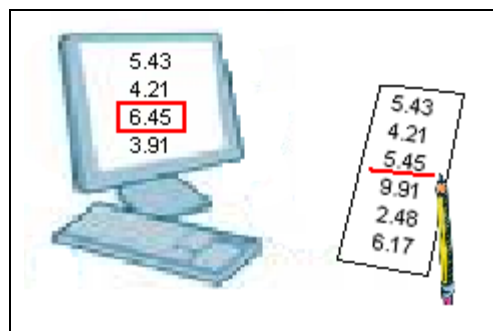


Figura 4.3 – Ilustração de introdução incorrecta dos valores no computador.

Sendo este tipo de erros inevitável de acontecer, é importante adoptar métodos de execução para diminuir a probabilidade ocorrência e também, garantir a sua detecção.

4.3.2. ERROS SISTEMÁTICOS

Erros sistemáticos são produzidos por causas conhecidas, sendo possível a sua eliminação após executadas as medições, através de fórmulas ou valores constantes previamente determinados. Este tipo de erros é entre outros, normalmente decorrente de má condução da experiência, má calibração dos instrumentos e descuidos de planeamento. Em qualquer dos casos resultam na distorção da medição, alterando todos os resultados, causando assim, um desvio acentuado do valor correcto.

Um bom exemplo deste tipo de erros é a alteração volumétrica dos materiais com a temperatura. Uma régua de metal é concebida com dada precisão, ou seja, mantém o seu comprimento, para um determinado intervalo de temperatura. Qualquer observação realizada fora dessa gama de valores, de temperatura, possui um erro sistemático, que pode ser corrigido, através do conhecimento da razão da expansão do metal com a temperatura.

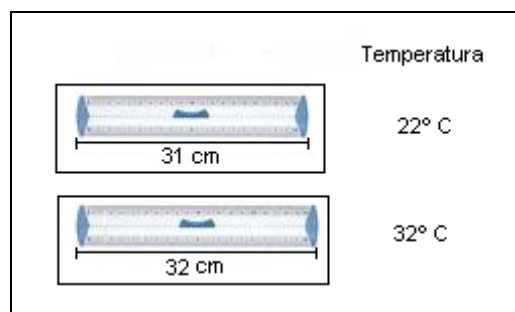


Figura 4.4 – Ilustração da variação de expansão de uma material com a temperatura.

A característica principal dos erros sistemáticos é a sua distribuição unilateral, ou seja, os erros afectam de igual forma todas as medições, sempre para mais ou sempre para menos. Os erros sistemáticos fazem com que o resultado da medição seja sempre maior ou sempre menor do que o valor real.

De seguida serão apresentados alguns exemplos de erros sistemáticos (Cardoso et al, 2004):

- erro cometido usando uma régua graduada, quando o observador mede os comprimentos sem fazer coincidir o zero da régua com uma das extremidades do comprimento a medir (Figura 4.5);

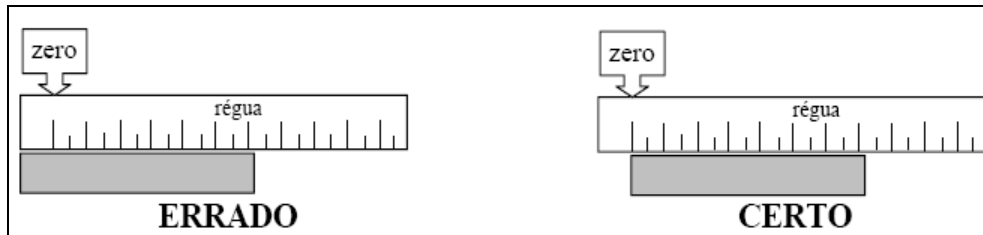


Figura 4.5 – Ilustração de erros sistemáticos devido ao mau posicionamento da régua (Cardoso et al., 2004).

- erro de paralaxe, nas leituras de uma escala de um instrumento analógico, quando o observador não se coloca em frente do ponto de leitura no instrumento;

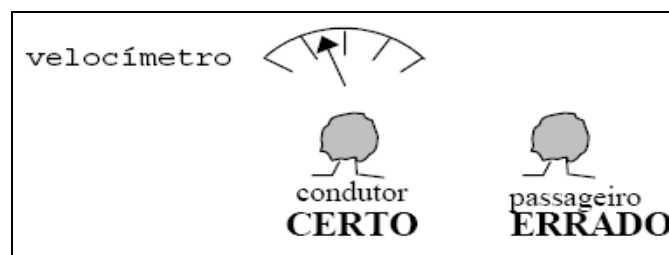


Figura 4.6 – Ilustração de erros sistemáticos devido ao posicionamento do anotador em relação ao instrumento de medição (Cardoso, et al, 2004).

- erro na medição de tempos com um cronómetro que se atrasa;
- erro na medição de resistências eléctricas com um ohmímetro, quando não se acertou previamente o zero da escala;
- erro de calibração do aparelho de medida;
- erro na medição da diferença de potencial existente entre dois pontos de um circuito, quando essa parte do circuito tem uma resistência tão grande que é comparável à resistência interna do voltímetro usado na medição;
- erro devido ao facto de as condições experimentais não corresponderem às condições assumidas teoricamente (*método* inadequado). Por exemplo, o cálculo do movimento de um corpo, através de equações que não consideram a existência de atrito, estará afectado por um erro sistemático, visto que, o atrito é uma força importante no desenvolvimento do movimento, e não é quantificada.

Alguns dos erros sistemáticos referidos anteriormente são fáceis de detectar e eliminar. No entanto, no decorrer de uma experiência podem existir vários tipos de erros sistemáticos que não são evidentes, os quais passam despercebidos.

É necessário ter em atenção, que quando são alteradas as condições de medição, também são alterados os erros sistemáticos presentes, isto porque, na generalidade uma medição engloba erros sistemáticos. Neste caso, é importante referir que não é boa prática agrupar resultados obtidos em experiências diferentes para, por exemplo, calcular a sua média aritmética, já que os resultados de experiências diferentes têm erros sistemáticos diferentes.

Na presença deste tipo de erros, um aumento do número de medições com o mesmo aparelho não altera os erros sistemáticos (portanto não os atenua, nem elimina), isto porque, os erros sistemáticos têm a característica de serem unilaterais.

4.3.4. ERROS ACIDENTAIS

Os erros acidentais, também conhecidos por estatísticos ou aleatórios, são encontrados em todo o tipo de observações, visto que, são naturalmente decorrentes da própria experiência, uma vez que o rigor absoluto ou reprodução exacta dos valores em sucessivas medições não são de esperar. Praticamente todo o trabalho experimental, ainda que muito dele automatizado, está sujeito a pequenas variações, pois mesmo a instrumentação tem limites quanto ao número de dígitos significativos. Facilmente é constatada a sua presença, na medida que, após a eliminação dos erros grosseiros e dos sistemáticos, os valores observados continuam a apresentar discrepâncias para uma mesma grandeza. Ao contrário dos sistemáticos e na ausência destes (como um das suas designações os caracteriza), este tipo de erros afectam as medições de forma aleatória, ou seja, umas vezes para mais outras para menos, e em sucessivas medições os valores obtidos são distribuídos em torno do verdadeiro valor (Figura 4.7). Assim, é possível detectar os erros estatísticos, como também, poderá ser minimizado o intervalo de variação dos valores medidos, desde que as repetições sejam feitas sem alterar as condições da experiência, para que não sejam introduzidos erros sistemáticos (conforme para os erros sistemáticos).

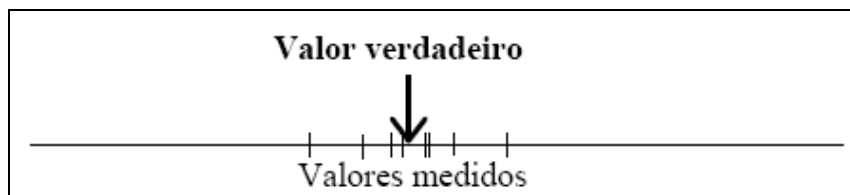


Figura 4.7 - Ilustração da distribuição de valores medidos (com erros acidentais) em relação ao valor real. (Cardoso et al, 2004)

Na eventualidade de existirem erros sistemáticos além dos erros estatísticos, aquando das medições, a distribuição dos resultados será em torno de um valor deslocado, como exemplifica a Figura 4.8:

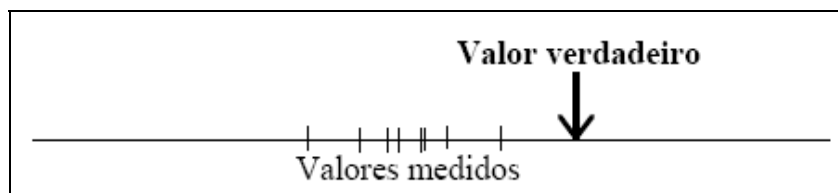




Figura 4.8 - Ilustração da distribuição de valores medidos (com erros acidentais e sistemáticos) em relação ao valor real. (Cardoso et al, 2004).

Na maioria das vezes os erros acidentais não estão directamente ligados a causas conhecidas. Para melhor compreensão serão referidas duas acções, nas quais são possíveis de serem cometidos este tipo de erros, a título de exemplo (Cardoso, et al, 2004):

- erro cometido ao accionar um cronómetro;

	<p>No acto de accionar um cronómetro, por vezes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ o operador inicia o cronómetro antes do tempo, ▪ o operador inicia depois do tempo <p>Nota: o erro de accionar o cronómetro, tanto pode ser antes do tempo ou depois (é aleatório)</p>
--	--

- erro de leitura numa escala.

<p>Leitura: 2</p>  <p>Leitura: 3</p> 	<p>Quando a escala de medição não é suficientemente pequena que não suscitem dúvidas, por vezes:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ a leitura é realizada para cima▪ a leitura é realizada para baixo <p>Nota: o valor depende da interpretação do observador</p>
---	---

Este tipo de erro, não obedece a qualquer lei sistemática, têm magnitude e sinal variável. São todos os restantes erros não definidos acima, erro por imperícia do observador ou má leitura da escala, ou pela alteração das condições de observação, etc.

4.4.4. OUTROS ERROS

Alem dos três tipos de erros referidos, que estão directamente ligados com o acto de medição, ou seja, com a experiência, é importante mencionar também os erros relacionados com o tratamento de dados. A utilização dos valores medidos em operações matemáticas impõem as aproximações, ou seja, acções de arredondamentos, como a seguir são descritas:

Erros de truncatura - Resultam do uso de fórmulas aproximadas. Por exemplo, quando se tomam apenas alguns dos termos do desenvolvimento em série de uma função.

Erros de arredondamento - Resultam da representação de números reais com um número finito de algarismos significativos. Este tipo de erro é habitual já que os equipamentos de cálculo normalmente utilizados (computadores) funcionam em dupla precisão, o que corresponde à utilização por parte do software de aproximadamente 15 algarismos significativos.

Propagação de erros

A utilização dos valores obtidos na experiência, geralmente, têm como objectivo serem utilizados em diversas expressões numéricas para o cálculo de parâmetros.

Quando são efectuadas operações sobre números sujeitos a erros, estes propagam-se aos resultados das operações, que vão reflectir a incerteza dos números que compõem a operação. Ou seja, depois de se medir directamente várias grandezas, podem utilizar-se esses dados para calcular o valor de uma grandeza final. Os erros dos valores medidos irão determinar o erro do resultado final.

Por exemplo, considerando a e b aproximações com, respectivamente, erros máximos e_a e e_b e admitindo e_a , e_b sempre positivos:

$$(a \pm e_a) + (b \pm e_b) = a + b \pm (e_a + e_b)$$

$$(a \pm e_a) \times (b \pm e_b) \approx a.b \pm (a.e_b + b.e_a)$$

4.5. ERROS NO ENSAIO DMT

Este capítulo tem como objectivo mostrar os tipos de erros inerentes à execução do ensaio com o Dilatómetro de Marchetti.

Antes de iniciar a descrição dos possíveis erros inerentes ao equipamento, não é de mais referir (uma vez que já foi exposto no subcapítulo 3.4. *Perturbação*

introduzida pelo equipamento) que a introdução do equipamento no solo provoca um reajuste das partículas, e consequentemente as condições do solo não serão as originais, mesmo sendo o DMT um dos ensaios “in situ” que menos perturbações provoca. Esta alteração nas condições do solo provoca naturalmente um erro na avaliação.

Sendo este um erro do tipo Sistemático, a sua rectificação será através da execução de inúmeros ensaios para quantificação do aumento da pressão, ou averiguação do seu comportamento para cada tipo de solo. Verificada a relação é possível proceder à correcção das pressões, ou seja, a dedução dos parâmetros tem em conta este pressuposto. No caso de não haver valores suficientes para haver uma quantificação, é possível executar os cálculos dos parâmetros, mas tendo sempre em conta quando da atribuição de valores, estes estão influenciados pela indução de tensões quando da introdução da lâmina do DMT no solo.

4.5.1. PRECISÃO DO EQUIPAMENTO

As medições efectuadas no ensaio DMT são executadas a partir do deslocamento de um cilindro (expansão da membrana) de “plexiglass” calibrado (altura $3.90 \pm 0.01\text{mm}$), que não pode ser regulado pelo operador. Esta medida fixa, pretende assim assegurar a precisão do movimento (Marchetti et al. 2001). O sistema de deslocamento que assegura a expansão da membrana será aproximadamente $1.10 \text{ mm} \pm 0.02 \text{ mm}$. Esta variação de 0.02 mm corresponde ao erro de 0.01 mm de precisão no fabrico destes cilindros e à possível dilatação provocada pela temperatura nestes componentes, que introduz um erro inferior a 0.01 mm (Marchetti, 1997).

Marchetti (1997) cita: “Desde que a precisão da pressão e do deslocamento seja alta, a precisão instrumental dos resultados do DMT também é alta, apesar da simplicidade das operações.”

4.5.1.1. PRECISÃO DOS MANÓMETROS

As leituras efectuadas com o ensaio Dilatómetro de Marchetti são valores de pressão obtidos através de dois manómetros de diferentes escalas (ver Figura 4.9). O manómetro de menor grandeza tem como menor divisão 0.05bar. Supõe-se que o erro associado a cada leitura é de metade da menor divisão da escala, ou seja, que o erro associado a cada leitura será de $\pm 0.025\text{bar}$ (esta escolha assenta no facto de se assumir que o operador é capaz de fazer um arredondamento correcto). O outro manómetro apresenta como menor divisão de escala um bar, e a leitura poderá ser feita com a precisão 0.5 bar (que equivale a metade da menor escala).

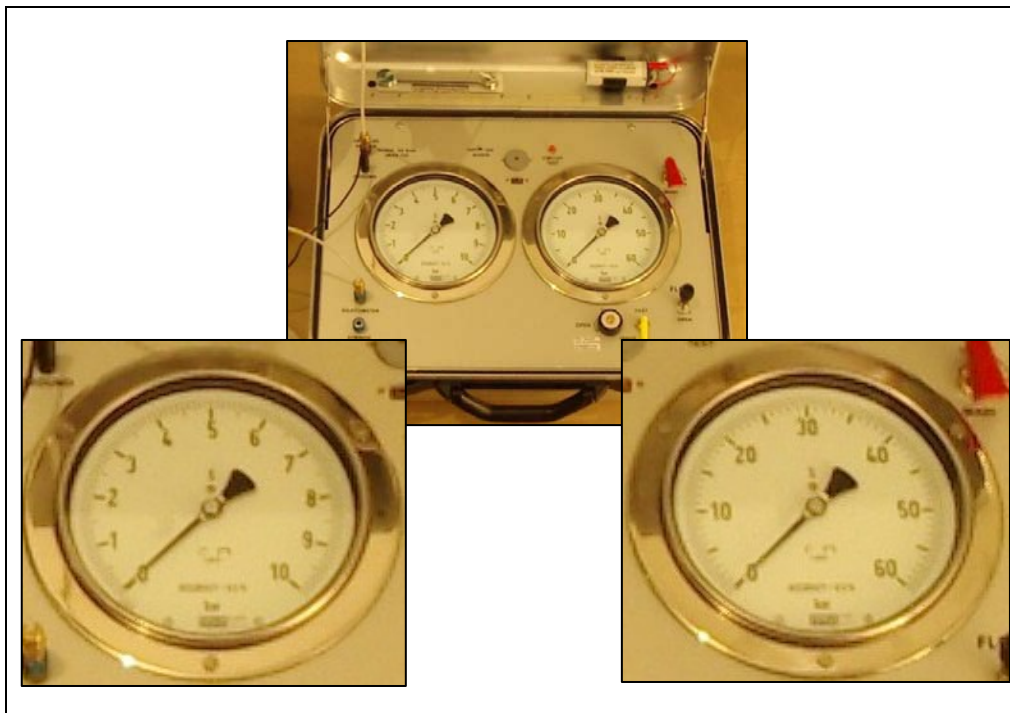


Figura 4.9 – Imagem dos dois manómetros do aparelho de medição de pressão do DMT.

4.5.1.2. PRECISÃO NAS MEDIÇÕES DE PROFUNDIDADE

A medição da profundidade do ensaio e do nível freático, normalmente, são efectuadas com recurso a uma fita métrica. A precisão será indicada pela menor escala marcada nestes instrumentos de medição. As fitas métricas mais usuais são as que possuem como menor escala o milímetro, a que corresponde a uma precisão de ± 0.5 mm.

Mas esta precisão nem sempre é possível, como a seguir é descrito em alguns exemplos:

- As marcas nas barras de introdução da lâmina no solo, indicadoras de 20 cm, exibem uma espessura superior a um milímetro, tanto as que já estão pré-marcadas e as que são marcadas antes do início do ensaio.
- A percepção se a marca está ao nível do terreno, não é possível com precisão milimétrica, pois o operador manobra a máquina de pé e a perspectiva não é a ideal, pois não está ao nível da marca.

4.5.2. PROCEDIMENTOS NO ENSAIO

Durante a execução do ensaio, as acções dos operadores podem adicionar erros sistemáticos e aleatórios. De seguida serão referidos os erros que puderam acontecer com maior frequência:

Erros sistemáticos:

- Erro de paralaxe, má colocação, em relação ao manómetro, do observador responsável pelas leituras (Figura 4.10);

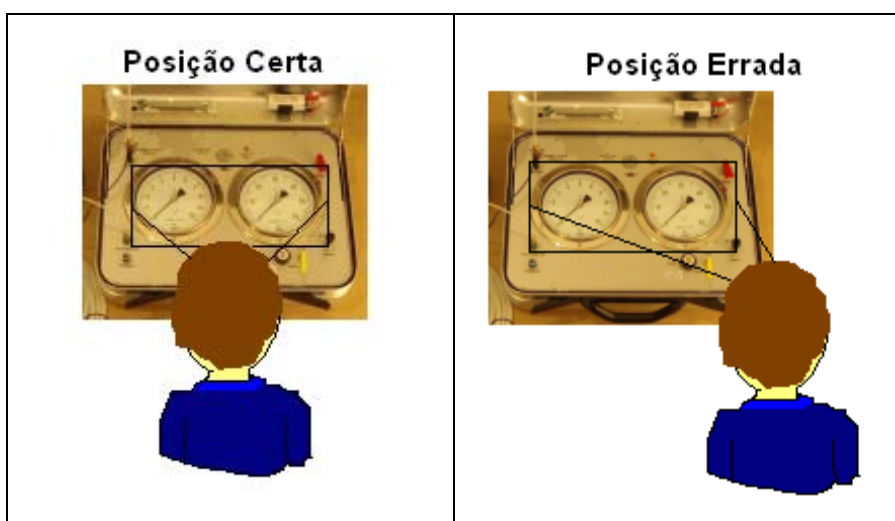


Figura 4.10 – Mau posicionamento do operador em relação aos manómetros, o que induz uma leitura incorrecta.

- Deficiente funcionamento (ou calibração) dos manómetros, indicando uma pressão incorrecta;

Erros aleatórios:

- Distracção do operador que comanda a penetração da lâmina no solo, podendo ultrapassar os 20cm (ilustração na Figura 4.11);

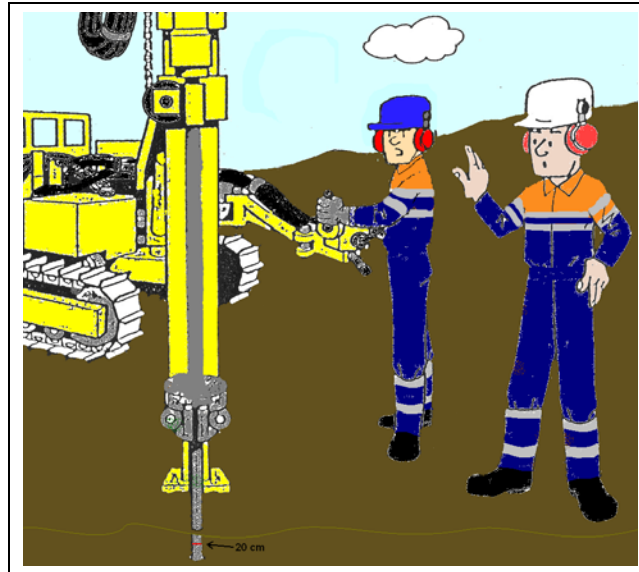


Figura 4.11 – Consequência da distração do operador (pode levar à introdução das varas mais de 20 cm).

- Introdução de 20cm, não exacta, visto que, a localização do operador da máquina não é ideal, e consequentemente não pode garantir o nível certo de introdução (Figura 4.12);

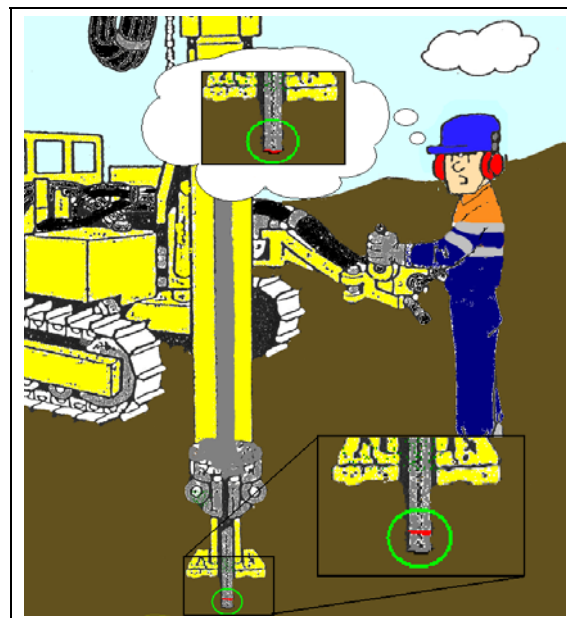


Figura 4.12 – Deficiente leitura, localização do operador não está ao nível do solo (o operador tem uma perspectiva enganadora).

- A distração do operador responsável pelo registo das leituras pode causar um atraso no registo da leitura, anotando uma pressão que não será a mais correcta (Figura 4.13).

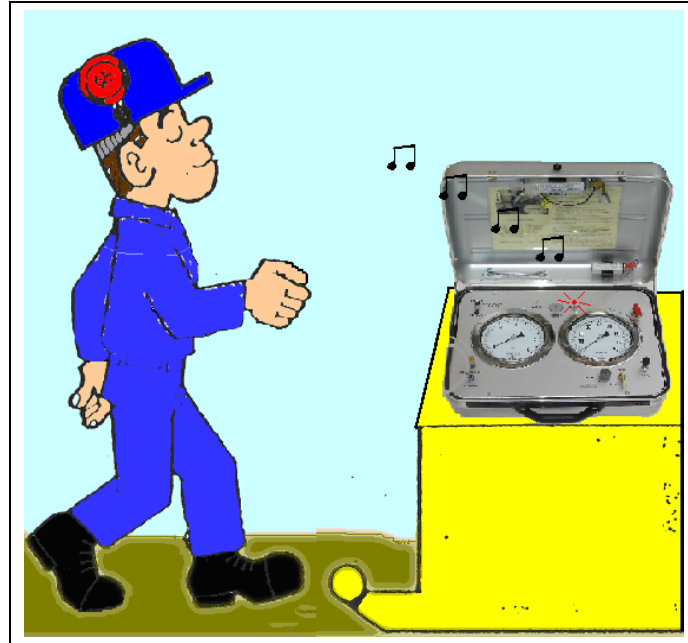


Figura 4.13 – Distracção do operador que provoca um desfasamento da leitura após o desligar/ligar do sinal áudio e visual.

No entanto, neste trabalho estuda-se o equipamento e como tal, assume-se que o operador é consciente, e consequentemente toma as devidas previsões para minimizar situações de erros e efectuar as leituras correctamente.

4.5.3. PROCESSAMENTO DAS LEITURAS

Obtidas as leituras de pressão, estas são processadas para obtenção dos parâmetros geotécnicos. Este processamento é realizado através da utilização das pressões corrigidas em variadas expressões matemáticas, através das quais são obtidos os valores dos parâmetros geotécnicos pretendidos.

Como se tem vindo a demonstrar, os erros são parte inerente do ensaio, e são prolongados até ao processamento das leituras. De seguida serão indicados os erros mais frequentes no processamento de dados:

- Erros na introdução dos valores das leituras na consola de cálculo (introdução de um algarismo errado ou erro nas casas decimais);
- Erros de propagação, a quando da não detecção de um erro não conhecido à partida, e este será reproduzido por todas as expressões matemáticas que o utilizem.

Capítulo 5. Modelo Analítico

5. MODELO ANALÍTICO

Na determinação dos valores finais de um ensaio deste tipo, os resultados numéricos são influenciados por vários tipos de erros: erros nos dados introduzidos (leituras efectuadas pelo operador, precisão do equipamento de medição, arredondamento de constantes, etc.), simplificações feitas à modelação matemática do processo físico, erros nos cálculos (mesmo trabalhando em dupla precisão), etc. O efeito de alguns desses erros pode ser reduzido ou mesmo eliminado, mas noutros casos a atenuação encontra acentuada dificuldade.

5.1. MODELAÇÃO NUMÉRICA

5.1.1. INTRODUÇÃO

Qualquer tipo de medição terá algum grau de incerteza, conforme foi já referido. A incerteza num valor medido é propagada nos cálculos que utilizem este valor. O impacto desta incerteza no valor final do cálculo depende de como é executado, ou seja, qual(ais) a(s) operação(ões) numérica(s) a que o valor medido é sujeito. Em alguns cálculos, pequenas variações nos dados de entrada, devido a incertezas dos valores medidos, podem resultar em grandes variações nos valores calculados. Inversamente, alguns cálculos não são afectados por pequenas variações nos dados de entrada e resultam em valores finais relativamente estáveis, mesmo que com variações.

5.1.2. MODELO DE CÁLCULO

A análise de erros no ensaio DMT implica os erros nas leituras, mas também o comportamento destes nas expressões matemáticas, utilizadas para a obtenção dos vários parâmetros geotécnicos.

Em seguida, apresenta-se uma fórmula para análise da propagação do erro em função dos majorantes do erro absoluto, que tem como base a expansão em série de Taylor com uma aproximação de 1ª ordem [Dahlquist et al., 1974]:

$$|\overline{\delta y}| \leq \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i}(\tilde{x}) \right| \times |\overline{\delta x_i}| \quad (5.1)$$

onde se assume que $y(x_1, \dots, x_n)$ é uma função real de variáveis reais, com derivadas parciais $\frac{\partial y}{\partial x_i}, i = 1, \dots, n$ contínuas numa vizinhança do ponto $x \equiv (x_1, \dots, x_n)$, cuja aproximação é dada por $\tilde{x} \equiv (\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n)$, onde denotamos um majorante do erro absoluto com que \tilde{x}_i representa x_i por $|\overline{\delta x_i}|$ (e analogamente $|\overline{\delta y}| \equiv |y - \tilde{y}|$, onde $\tilde{y} \equiv f(\tilde{x})$).

Para o cálculo de uma aproximação do erro relativo foi usada a aproximação

$$\zeta y \equiv \frac{|y - \tilde{y}|}{|y|} \approx \frac{|\overline{\delta y}|}{|\tilde{y}|}, \tilde{y} \neq 0. \quad (5.2)$$

É importante salientar que este modelo tem como objectivo calcular a aproximação² do majorante do erro, ou seja, uma aproximação do limite superior do erro.

Nota: Neste trabalho o erro absoluto associado à variável x é representado por δ e o erro relativo, associado à mesma variável, por ζ .

5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

5.2.1. INTRODUÇÃO

A análise estatística é uma ferramenta cada vez mais utilizada em várias áreas, nomeadamente: Engenharia, Matemática, Economia, Gestão, Saúde, Sociologia, Psicologia, etc., como um método de análise e interpretação de dados, e em particular para a elaboração de conclusões fundamentadas a partir da observação destes

² Pois a fórmula fundamental da teoria de erros é uma aproximação de 1ª ordem da série de Taylor

A tecnologia informática, hoje disponível, tornou possível a análise de quase qualquer tipo de dados. O impacto da evolução tecnológica faz-se sentir na rapidez com que se analisa uma base de dados de média dimensão e relativa complexidade, bastando para tal que se possua um microcomputador, softwares adequados e, não menos importante, o conhecimento da teoria que fundamenta o software e os critérios de aplicabilidade inerentes.

Sendo um método com capacidade para representar graficamente os dados de análise e funcionar de um modo interactivo com o investigador, a análise estatística torna-se num instrumento importante em qualquer etapa do processo de investigação.

Uma das questões que surgiu durante o decorrer deste trabalho, foi se o comportamento dos erros relativos associados a alguns dos parâmetros em estudo seriam influenciados pelo tipo de solo em que se fazia o teste, por outras palavras, “o dilatómetro é igualmente fiável nos diversos tipos de solo?”. Para responder a essa questão, socorremo-nos da estatística

5.2.2. TESTES PARAMÉTRICOS

A comparação de parâmetros populacionais (média, variância, mediana, etc.) a partir de amostras aleatórias é uma das necessidades mais frequentes em análise estatística. Este tipo de inferência estatística é particularmente útil para testar a significância de tratamentos ou factores que são capazes de influenciar a resposta da variável medida e, em que se pretende testar se o tratamento teve ou não um efeito significativo. Existem, basicamente, duas metodologias para fazer este tipo de testes: Os testes paramétricos exigem que a forma da distribuição amostral seja conhecida (a Normal é a mais utilizada...). Os testes não-paramétricos não exigem à partida o conhecimento da distribuição amostral (o que não implica, porém, que estes testes não possuam outras condições de aplicação) e podem então ser aplicados sempre como alternativa aos testes paramétricos.

Condições de aplicação dos testes paramétricos

Os testes paramétricos, de um modo geral, exigem a verificação simultânea das seguintes condições:

1. Que a variável dependente possua distribuição normal,
2. Que as variâncias populacionais sejam homogêneas caso sejam comparadas duas ou mais do que duas populações.

5.2.2.1. TESTE ANOVA

A comparação de médias de duas ou mais populações de onde foram extraídas amostras aleatórias e independentes pode fazer-se através de uma metodologia proposta por Sir Ronald Fisher e genericamente designada por Análise de Variância (abreviadamente ANOVA do inglês *Analysis of Variance*) (Fisher, 1935) se a distribuição da variável em estudo for Normal e se as variâncias populacionais forem homogêneas.

De uma maneira geral este teste faz a avaliação da existência de diferenças estatisticamente significativas, como por exemplo:

“Se a variância residual (aquela associada aos erros de medida e outros) for significativamente inferior à variância entre grupos ou amostras (que seria devida ao efeito do factor sob estudo), então as médias populacionais estimadas a partir das amostras, são significativamente diferentes (relembre-se que as variâncias populacionais terão de ser homogêneas). A interpretação gráfica deste conceito é ilustrada na Figura 5.1.”

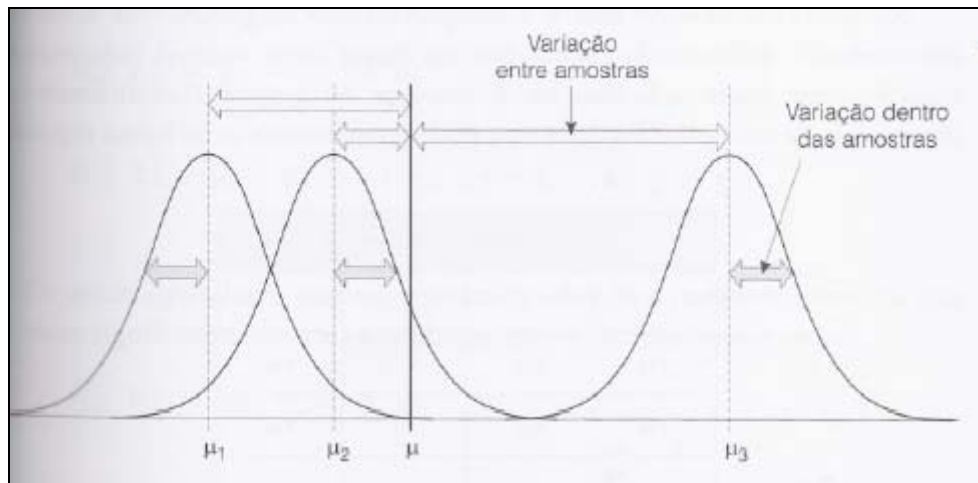


Figura 5.1 – Ilustração de comparação de variâncias (Maroco, 2007).

ANOVA é um método de análise de variância simples, na qual é executada uma avaliação das diferenças entre médias apenas para uma variável critério.

Este método de análise utiliza dois passos sequenciais (Reis, 1997):

- Testa a hipótese global de igualdade de médias entre grupos;
- Se o resultado do passo anterior for significativo, utilizam-se testes adicionais no sentido de explicar as diferenças entre grupos.

5.2.3. TESTES NÃO PARAMÉTRICOS

Os testes não paramétricos são considerados geralmente como alternativa aos testes paramétricos quando as condições de aplicações destes, nomeadamente a normalidade da variável sob estudo e a homogeneidade de variâncias entre grupos, não se verificam. Os testes não-paramétricos não exigem que a distribuição da variável sob estudo seja conhecida (normal), e daí estes testes serem também conhecidos por testes adistribucionais (*distribution-free tests*). Para amostras de pequenas e diferentes dimensões e onde as variáveis sob estudo não verificam os pressupostos dos métodos paramétricos, os testes não paramétricos podem ser mais potentes.

5.2.3.1. TESTE DE KRUSKAL-WALLIS

O teste Kruskal-Wallis pode ser considerado como a alternativa não-paramétrica à ANOVA *one away*) (Kruskal & Wallis, 1952). Este teste pode ser então usado para testar se duas ou mais amostras provém de uma mesma população ou de populações diferentes ou se, de igual modo, as amostras provém de populações com a mesma distribuição.

Este teste a vantagem de não usar como pressuposto a homocedasticidade (igualdade de variâncias), o que poderá ser de grande utilidade como será visto mais à frente, nem obrigar que a população tenha uma distribuição normal:

Capítulo 6. Apresentação e Análise de Resultados

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo tem como objectivo apresentar e analisar os resultados obtidos, mas também serão incluídos todos os pressupostos e “experiências” executadas ao longo da elaboração do código.

6.1. PRESSUPOSTOS INICIAIS

6.1.1. DISTRIBUIÇÃO DE MEDIÇÕES

A realização do estudo numérico assentou em 99 ensaios criteriosamente seleccionados de modo a abranger os principais tipos de solos existentes na natureza. Assim, estabeleceram-se 4 grupos de referência – sedimentares argilosos, sedimentares arenosos, residuais graníticos, aterros – com distribuição de medições indicadas no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Resumo das distribuições das medições (valores globais).

Tipo de solo	Designação do Grupo	Profundidade		Espessura		Leituras	
		Mínima	Máxima	Σ grupo	Total	Σ grupo	Total
Aterro	A	0.2	12.8	94.2	721	409	3304
Residuais	B	0.2	10.6	167.8		809	
Sed. Argilosos	C	0.2	26.8	255.4		1134	
Sed. Arenosos	D	0.2	13.0	203.6		952	

Num primeiro momento efectuou-se um estudo para determinação da precisão das leituras de campo com base na precisão associada a cada sistema de medição (manómetros, sistemas de medição dos deslocamentos, da profundidade e da posição do nível freático) que serviu de base ao cálculo das aproximações dos majorantes dos erros. Utilizando aritmética de dupla precisão, para cada leitura foram calculadas as aproximações dos erros (absolutos e relativos) associados a cada um dos parâmetros de referência (I_D , E_D , K_D , γ , σ'_v , M , k_0 , OCR , c_u , c' , ϕ , G_0), de que resultou um total de 190391 valores estimados. Os cálculos foram efectuados com programação em MatLab[®] usando a *symbolic toolbox* para o cálculo das derivadas parciais.

Nas secções seguintes apresenta-se a informação geral correlacionada com os quatro grupos de referência.

6.1.1.1. ATERROS

A necessidade de elevação do terreno promove a execução de transporte de solos para um determinado local pelo homem. Normalmente um aterro é construído em camadas com a compactação artificial, ou seja, através de equipamento próprio para o efeito. Os aterros, usualmente, são realizados segundo critérios de referência, que ditam as características do material, segundo classificação, curva granulométrica, equivalente de areia, limites e índice de plasticidade, etc.

O Quadro 6.2 apresenta a distribuição de medições dos ensaios que fazem parte deste grupo.

Quadro 6.2 - Distribuição das Medições do Grupo A - Aterro.

Tipo de solo	Designação de ensaio	Profundidade		Espessura		Leituras	
		Inicial	Final	Ensaio	Σ grupo	Ensaio	Σ grupo
Aterro	A1	2.2	11.2	9	94.2	37	409
	A2	2.0	10.0	8.0		35	
	A3	1.8	12.8	11.0		42	
	A4	1.8	9.4	7.6		27	
	A5	3.2	9.6	6.4		28	
	A6	1.8	10.4	8.6		36	
	A7	1.0	6.2	5.2		23	
	A8	1.0	7.4	6.4		26	
	A9	0.4	5.0	4.6		20	
	A10	1.0	6.2	5.2		23	
	A11	1.2	5.0	3.8		16	
	A12	0.2	3.0	2.8		14	
	A13	0.2	1.4	1.2		6	
	A14	0.2	0.8	0.6		4	
	A15	0.2	3.2	3.0		15	
	A16	0.2	2.2	2.0		11	
	A17	0.2	3.2	3.0		15	
	A18	0.2	2.2	2.0		11	
	A19	0.2	4.0	3.8		20	

6.1.1.2. SOLOS RESIDUAIS

Os solos residuais são solos que se encontram no seu local de origem conservando a sua matriz original. Este tipo de solo, na generalidade, apresenta variações granulométricas significativas (elevado grau de heterogeneidade), podendo mesmo existir estruturas-reliquia que resultam da fracturação do maciço rochoso original. A principal característica, proveniente da sua formação é conservação de uma estrutura de cimentação, exibindo uma parcela de resistência mecânica denominada de coesão efectiva.

Quadro 6.3 - Distribuição das Medições do Grupo B – Solos Residuais.

Tipo de solo	Designação de ensaio	Profundidade		Espessura		Leituras	
		Inicial	Final	Ensaio	Σ grupo	Ensaio	Σ grupo
Residual	B1	0.4	7.0	6.6	167.8	31	809
	B2	0.2	7.4	7.2		35	
	B3	1.6	6.8	5.2		26	
	B4	0.2	4.6	4.4		14	
	B5	0.2	9.2	9.0		40	
	B6	0.6	3.6	3.0		15	
	B7	0.4	4.0	3.6		18	
	B8	0.2	3.8	3.6		15	
	B9	1.2	3.8	2.6		12	
	B10	0.2	3.0	2.8		15	
	B11	0.2	7.6	7.4		24	
	B12	0.2	4.0	3.8		19	
	B14	0.6	6.4	5.8		29	
	B15	0.2	2.8	2.6		14	
	B16	2.6	8.2	5.6		29	
	B17	0.6	6.2	5.6		29	
	B18	0.8	8.6	7.8		39	
	B19	0.4	8.4	8.0		40	
	B20	0.2	10.6	10.4		52	
	B21	1.2	5.6	4.4		23	
	B22	1.2	6.0	4.8		25	
	B23	1.2	3.6	2.4		13	
	B24	1.2	2.6	1.4		8	
	B25	0.2	6.2	6.0		28	
	B26	0.2	5.4	5.2		25	
	B27	0.2	8.2	8.0		38	
	B28	0.6	8.0	7.4		33	
	B29	1.6	9.2	7.6		39	
	B30	0.6	5.0	4.4		23	
	B31	0.2	7.0	6.8		35	
	B32	1	5.4	4.4		23	

O Quadro 6.3 apresenta a distribuição de medições referentes aos ensaios do agrupamento de solos residuais.

6.1.1.3. SOLOS SEDIMENTARES ARGILOSOS

Os solos sedimentares argilosos, provêm de processos de meteorização e transporte com deposição de partículas de dimensões muito pequenas, inferiores a 0.002mm de diâmetro. São caracterizados por possuírem baixa permeabilidade e desenvolverem resistências distintas a curto e longo prazo (não drenada e drenada).

O Quadro 6.4 exibe a distribuição de medições relativas aos ensaios do agrupamento dos solos Sedimentares argilosos.

Quadro 6.4 - Distribuição das Medições do Grupo C – Solos Sedimentares Argilosos.

Tipo de solo	Designação de ensaio	Profundidade		Espessura		Leituras	
		Inicial	Final	Ensaio	Σ grupo	Ensaio	Σ grupo
Sedimentar Argiloso	C1	14.4	14.2	14.4	255.4	62	1134
	C2	26.0	25.4	26.0		116	
	C3	26.8	23.4	26.8		95	
	C4	25.0	24.0	25.0		116	
	C5	14.2	11.6	14.2		54	
	C6	12.0	11.2	12.0		54	
	C7	7.0	4.8	7.0		14	
	C8	9.6	8.2	9.6		39	
	C9	7.6	6.8	7.6		27	
	C10	7.0	6.0	7.0		30	
	C11	17.6	17.2	17.6		82	
	C12	19.4	19	19.4		91	
	C13	15.2	14.4	15.2		73	
	C14	12.2	9.4	12.2		23	
	C15	11.8	7.6	11.8		32	
	C16	8.0	4.0	8.0		17	
	C17	21.0	19.2	21.0		72	
	C18	10.0	8.2	10.0		41	
	C19	8.4	7.4	8.4		35	
	C20	8.8	8.2	8.8		37	
	C22	6.8	5.2	6.8		24	

6.1.1.4. SOLOS SEDIMENTARES ARENOSOS

Este grupo engloba solos com o mesmo tipo de origem do caso anterior, mas com deposição de partículas de maiores dimensões, na ordem de 0.006 a 0.2mm. Os solos arenosos desenvolvem comportamentos drenados, e são muito permeáveis, sendo a magnitude desta última característica dependente da percentagem de finos constituinte da sua curva granulométrica.

O Quadro 6.5 expõe a distribuição de medições relativas aos ensaios do agrupamento dos solos Sedimentares argilosos.

Quadro 6.5 - Distribuição das Medições do Grupo D – Solos Sedimentares Arenosos.

Tipo de solo	Designação de ensaio	Profundidade		Espessura		Leituras	
		Inicial	Final	Ensaio	Σ grupo	Ensaio	Σ grupo
Sedimentar Arenoso	D1	0.4	5.0	4.6	203.6	23	952
	D2	0.2	7.2	7.0		31	
	D3	0.2	10.0	9.8		49	
	D4	0.2	9.6	9.4		48	
	D5	7.4	11.0	3.6		16	
	D6	0.2	12.0	11.8		45	
	D7	0.2	4.6	4.4		15	
	D8	0.2	10.8	10.6		43	
	D9	0.4	7.6	7.2		33	
	D10	1.0	13.0	12.0		29	
	D11	7.8	13.0	5.2		27	
	D12	0.4	6.2	5.8		30	
	D13	0.2	6.2	6.0		31	
	D14	0.4	8.6	8.2		40	
	D15	0.6	9.2	8.6		43	
	D16	0.4	9.0	8.6		44	
	D17	0.4	12.2	11.8		58	
	D18	0.6	6.2	5.6		29	
	D19	0.4	9.2	8.8		45	
	D20	0.6	9.2	8.6		44	
	D21	0.4	6.8	6.4		30	
	D22	0.4	5.0	4.6		24	
	D23	0.4	8.4	8.0		40	
	D24	0.6	8.0	7.4		38	
	D25	0.4	9.6	9.2		47	
	D26	0.6	11.0	10.4		50	

6.1.2. PRECISÕES DE PARÂMETROS DE ENTRADA

Os valores de entrada fundamentais do programa de cálculo são as leituras efectuadas nos manómetros do equipamento. Estes valores têm associado um erro de leitura, que depende da menor escala do aparelho. Os ensaios que fazem parte da base de dados deste trabalho foram executados por operadores que registaram o valor por arredondamento. Assim, os valores dos majorantes dos erros associados às grandezas medidas foram:

Nome	Variável	Erro absoluto máximo
Leitura ΔA (deslocamento 0.05m – no vazio)	ΔA	$\delta \Delta A \leq 0.025$
Leitura ΔB (deslocamento 0.05m – no vazio)	ΔB	$\delta \Delta B \leq 0.025$
Leitura A (deslocamento 0.05mm)	A	$\delta A \leq 0.025$
Leitura B (deslocamento 1.1mm)	B	$\delta B \leq 0.025$
Leitura C (deslocamento 0.05 – descarga)	C	$\delta C \leq 0.025$

Por outro lado, quanto às constantes utilizadas como parâmetros de entrada, as aproximações consideradas foram:

Nome	Variável	Erro absoluto máximo
Peso volúmico da água	γ_w	$\delta \gamma_w \leq 0.01 \text{KN/m}^3$
Peso volúmico de topo ³ ,	γ_{top}	$\delta \gamma_{\text{top}} \leq 0.1 \text{KN/m}^3$
Profundidade	z	$\delta z \leq 0.005 \text{ m}$
Nível freático	NF	$\delta z \leq 0.005 \text{ m}$

Foram admitidos estes erros absolutos máximos tendo em conta, nomeadamente, no caso do peso volúmico da água, que este varia com a latitude e longitude do local onde se encontra. Foi verificado o valor γ_w para as diferentes latitudes dos locais de ensaio e obtivemos uma variação de 0.01KN/m^3 em relação ao valor de referência 9.80KN/m^3 .

³ Peso volúmico de topo é um dos valores que é necessário inserir no início do cálculo. Este valor, que normalmente é zero, só tem expressão se a cota inicial do ensaio for diferente da cota superficial do terreno.

Nota: Foram usadas mais constantes no cálculo de alguns parâmetros, mas não serão enunciadas com pormenor, porque são valores retirados de correlações e expressões matemáticas e o erro associado está directamente relacionado com a ordem de arredondamento. Por exemplo:

Valor da constante	Erro absoluto máximo
0.356	$\delta \leq 0.0005$

6.1.3. EXPRESSÕES NUMÉRICAS UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

No cálculo do majorante do erro, como sua propagação, não foram testadas todas as expressões matemáticas para a determinação dos diferentes parâmetros, foram escolhidas as mais utilizadas em Portugal.

Estado de tensão “in situ”, K_0 (Marchetti, 1980, 1985)

Se $I_D \leq 1.2$	Se: $(K_D/1.5)^{0.47} - 0.6 < 0.3$ $\Rightarrow K_0 = 0.3$
	Se: $(K_D/1.5)^{0.47} - 0.6 \geq 0.3$ $\Rightarrow K_0 = (K_D/1.5)^{0.47} - 0.6$
Se $I_D \geq 1.2$	$\Rightarrow K_0 = 0.376 + (0.038 \times K_D)$

Grau de sobreconsolidação, OCR (Marchetti & Crapps, 1981)

Se $I_D \leq 1.2$	$OCR = (0.5 \times K_D)^{1.56}$
Se $I_D \geq 1.2$	$OCR = (0.67 \times K_D)^{1.91}$
Se $1.2 < I_D < 2$	$OCR = ((0.5 + 0.1 \times ((I_D - 1.2)/0.8)) \times K_D)^{1.56 + 0.35 \times ((I_D - 1.2)/0.8)}$

Coesão não drenada, c_u (Marchetti, 1980)

$$\text{Se } I_D \leq 1.2 \rightarrow c_u = 22 \times (\sigma'_v \times (0.5 \times K_D)^{1.25}) / 10$$

Ângulo de atrito, ϕ (Marchetti, 1997)

$$\text{Se } I_D > 0.9 \rightarrow \phi = 28 + 14.6 \times \log_{10}(K_D) - 2.1 \times (\log_{10}(K_D))^2$$

Coesão efectiva em solos residuais (Cruz et al., 2006)

Símb	Designação	Expressão numérica
c'	Coesão efectiva	$c' = 0.3766 \times \text{OCR} + 3.0887$

Módulo de deformabilidade, M (Marchetti, 1980)

Se $I_D \leq 0.6$	Se : $0.14 + 2.36 \times \log_{10}(K_D) < 0.85$ $\Rightarrow M = 0.85 \times E_D$
	Se : $0.14 + 2.36 \times \log_{10}(K_D) \geq 0.85$ $\Rightarrow M = (0.14 + 2.36 \times \log_{10}(K_D)) \times E_D$
Se $I_D > 3$	Se: $0.5 + 2 \times \log_{10}(K_D) < 0.85$ $\Rightarrow M = 0.85 \times E_D$
	Se: $0.5 + 2 \times \log_{10}(K_D) \geq 0.85$ $\Rightarrow M = (0.5 + 2 \times \log_{10}(K_D)) \times E_D$
Se $0.6 < I_D < 3$	Se: $0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) + 2.5 - 0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) \times \log_{10}(K_D) < 0.85$ $\Rightarrow M = 0.85 \times E_D$
	Se: $0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) + 2.5 - 0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) \times \log_{10}(K_D) \geq 0.85$ $\Rightarrow M = (0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) + 2.5 - 0.14 + 0.36 \times ((I_D - 0.6)/2.4) \times \log_{10}(K_D)) \times E_D$

Módulo de Distorsional, G_0

Autor	Expressão numérica
Cruz et al. (2006)	$G_0 = E_D \times 3.9366 \times (I_D^{-0.6117})$
Hryciw (1990)	$G_0 = ((530/\sigma'_v)^{0.25}) \times ((\gamma - 1)/(2.7 - \gamma)) \times (k_0^{0.25}) \times \sigma'_v^{0.5}$

6.1.4. DADOS DE SAÍDA

A programação em MatLab[®] elaborada (disponível no ANEXO I) tem como produto final, uma tabela na qual são armazenados todos os valores calculados (valor estimado, aproximações dos majorantes dos erros absolutos e relativos) e apresentação de gráficos de todos os parâmetros (já referidos) versus a profundidade. Estes gráficos representam o valor estimado do parâmetro, valor estimado do parâmetro mais a aproximação do majorante do erro e valor estimado do parâmetro menos a aproximação do majorante do erro (que podem ser entendidos como um intervalo de confiança onde se pode situar o valor exacto da grandeza calculada). Os gráficos foram elaborados de forma a que a estratigrafia do terreno fosse visível, ou seja, através de uma escala de cores e dos subintervalos de I_D a cada 20cm a tela de fundo do gráfico tem a cor do tipo de solo. Adicionalmente é apresentado mais um gráfico de I_D versus profundidade, no qual o eixo de I_D é logaritmico e possui uma escala de cores representativa do tipo de solo.

No ANEXO II está disponível uma tabela resumo dos dados de saída, como também alguns gráficos executados pelo programa MatLab[®].

6.2. ANÁLISE DA PROPAGRAÇÃO DE ERROS

Antes de se proceder à análise dos valores obtidos é importante assinalar que o resultado de um estudo deste tipo reflecte apenas uma aproximação ao erro máximo teórico que pode ser cometido na sequência de uma leitura, isto é, o espaço numérico onde o erro se deverá encontrar. No entanto, o ensaio DMT é um ensaio quasi-contínuo (leituras de 20 em 20cm), pelo que os valores paramétricos de referência são atribuídos através da média de todas as medições efectuadas dentro de cada unidade geotécnica particular. Assim, o erro real cometido na definição do respectivo comportamento mecânico poderá ser bastante inferior ao máximo, dada a reduzida probabilidade de ocorrência dos valores máximos simultaneamente em todas as leituras.

6.2.1. PRESSUPOSTOS INICIAIS

A análise a seguir apresentada será feita sobre dados previamente estudados de forma a verificar irregularidades, ou valores desprezíveis. De seguida serão enumeradas os pressupostos desta verificação:

1. Valores de A menores que 0.8 eliminados

O fundamento deste pressuposto está relacionado com a proximidade do valor da leitura A ao valor da rigidez da membrana, visto que, esta pode variar entre 0.05 a 0.8. Assim sendo, uma leitura cujo valor seja inferior a 0.8 poderá simplesmente corresponder ao valor da rigidez da membrana e não à pressão que é exercida pelo solo.

2. Valores de OCR em profundidade menor que 0.6m eliminados

Foram retirados os valores do grau de sobreconsolidação das camadas mais superficiais do solo, uma vez que existe uma perturbação do solo à superfície, que influencia os respectivos resultados

3. Primeiras leituras de u_0 eliminadas

Foram retiradas as primeiras leituras do nível freático, pois estas podem ser influenciadas pela normal capilarização da água no solo.

4. Valores de U_D entre -0.01 a 0.01 eliminados

As pressões intersticiais dentro deste intervalo apresentam valores muito próximos de zero. A divisão (operação de cálculo do erro relativo) por um valor aproximadamente igual a zero é muito grande e esta grandeza foi excluída por representar valores não significativos, tendo em conta que este parâmetro não tem importância real. Além disso o valor do erro absoluto mantém-se sempre em níveis controlados.

6.2.2. PRESSÕES CORRIGIDAS

No Quadro 6.6 apresenta-se um resumo dos erros associados à determinação dos parâmetros básicos.

Quadro 6.6 - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Básicos (%).

	Aterros		S. Residuais		S. Argilosos		S. Arenosos	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
P_0	1 - 11	3	0 - 11	2	0 - 5	2	1 - 7	3
P_1	0 - 4	1	0 - 5	1	0 - 4	1	0 - 3	0
ΔP	1 - 13	2	0 - 18	2	1 - 67	16	0 - 12	1
P_2	---	---	0 - 50	13	1 - 25	6	3 - 33	11
u_0	---	---	2 - 21	6	1 - 21	3	2 - 21	5

As pressões básicas P_0 e P_1 exibem uma aproximação do majorante do erro constante, 0.055 e 0.050 respectivamente, ou seja, o comportamento deste erro é completamente indiferente ao tipo de solo e ao grau de profundidade. O erro relativo depende somente da magnitude da pressão lida, ou seja, quanto maior a pressão menor será o seu erro relativo.

Constata-se que o erro relativo médio das pressões básicas P_0 e P_1 é reduzido, respectivamente inferior a 5% e 2%. Já no que respeita à pressão diferencial, ΔP , esta apresenta-se variando num intervalo mais alargado (até 67%) embora o valor médio não ultrapasse 20% no caso dos solos argilosos e 5% nos restantes. O incremento do erro relativo de ΔP acontece sempre que as pressões exibem magnitudes idênticas. Esta semelhança torna o resultado da diferença um valor muito pequeno, aproximando-se da ordem de grandeza do erro.

No que respeita à avaliação das tensões intersticiais o erro relativo associado a u_0 é inferior a 20% (com valor médio de 5%), enquanto o erro relativo de P_2 pode atingir valores de 50%, embora com valor médio da ordem de 20%. A análise mais aprofundada revela que os valores mais elevados correspondem sobretudo a situações em que o valor da medição é baixo enquadrando-se na mesma ordem grandeza do valor numérico da aproximação do majorante do erro.

6.2.3. PARÂMETROS INTERMÉDIOS

No Quadro 6.7 apresenta-se um resumo dos erros associados à determinação dos parâmetros intermédios.

Quadro 6.7 - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Intermédios (%).

	Aterros		S. Residuais		S. Argilosos		S. Arenosos	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
I_D	1 - 23	5	1 - 29	4	2 - 73	18	1 - 19	5
E_D	0 - 13	2	0 - 18	2	1 - 67	16	0 - 12	1
K_D	1 - 12	4	1 - 16	5	1 - 26	9	1 - 16	5
U_D	---	---	1 - 143	41	2 - 356	15	4 - 630	119

O índice de material (I_D), revelando a sua dependência da tensão diferencial tende a apresentar um erro relativo em intervalos de 1 a 30%, com valores médios inferiores a 20% nos solos argilosos e 5% nos restantes tipos de solos. O mesmo se aplica ao módulo dilatométrico (E_D), no qual se verifica a tendência de os valores mais elevados se associarem aos solos mais finos. Os valores médios são inferiores a 20% no caso dos solos argilosos e 5% nos restantes.

O índice de tensão horizontal, K_D , cuja dependência assenta sobretudo em P_0 e u_0 , evidencia valores de erro relativo inferiores a 30% nos solos argilosos e nos restantes inferiores a 20%, com valores médios inferiores a 10% e 5%, respectivamente.

O erro relativo associado ao índice de tensão neutra, U_D , depende fundamentalmente do valor de P_2 e u_0 . Sendo que estas duas parcelas por vezes exibem valores altos, quando ocorrem simultaneamente proporcionam a elevação do erro relativo de U_D . Os valores médios podem atingir os 100%.

6.2.4. PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

No Quadro 6.8 apresenta-se um resumo dos erros associados à determinação dos parâmetros geotécnicos.

Quadro 6.8 - Intervalo de Erro Relativo dos Parâmetros Geotécnicos (%).

	Aterros		S. Residuais		S. Argilosos		S. Arenosos	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média
γ	0 - 8	1	0 - 8	1	0 - 13	4	0 - 6	1
σ	0 - 6	1	0 - 12	2	0 - 22	7	0 - 7	2
K_0	0 - 8	1	0 - 12	2	0 - 21	7	0 - 16	1
OCR	1 - 49	9	2 - 52	13	2 - 40	14	2 - 57	11
c_u	---	---	---	---	0 - 54	18	---	---
c'	---	---	1 - 42	8	---	---	---	---
ϕ'	0 - 3	1	0 - 3	1	---	---	0 - 4	1
M	0 - 13	2	0 - 14	0	0 - 80	21	0 - 15	2
G_0C	1 - 26	5	1 - 36	5	2 - 111	27	1 - 24	4
G_0H	0 - 36	5	0 - 39	6	0 - 67	21	0 - 31	5

A avaliação do peso volúmico e da consequente tensão vertical “in situ”, em solos granulares, evidência valores de erro relativo médio, em geral, inferiores a 2%, no caso dos solos argilosos o valor pode atingir 7%. O mesmo acontecendo com a avaliação do coeficiente de impulso em repouso, K_0 , e do ângulo de resistência ao corte de solos granulares.

No que se refere ao grau de sobreconsolidação, OCR, é conveniente referir que este parâmetro tem aplicação com significado apenas em solos argilosos evidenciando valores máximos inferiores a 40% e valores médios inferiores a 15%. Além destes solos, o parâmetro tem igualmente impacto em solos residuais uma vez que é utilizado para dedução da coesão efectiva e correcção do ângulo de resistência ao corte. Nestes casos, o valor médio mantém-se igualmente inferior a 15%.

A determinação da resistência não drenada em solos argilosos pode atingir valores superiores (50%), com os valores mais elevados a relacionarem-se sobretudo com a

profundidade e a posição do nível freático. No entanto, verifica-se que o valor médio associado a este parâmetro é substancialmente inferior, da ordem de 20%.

Em solos residuais, a avaliação dos parâmetros de resistência, coesão efectiva (c') e ângulo de resistência ao corte (ϕ') assumem valores máximos de erro relativo menores que 45% e 5%, respectivamente. Para o primeiro caso, os valores médios rondam os 10%.

Nos restantes solos granulares o ângulo de resistência ao corte exhibe erros relativos máximos inferiores a 5% e valores médios de 1%.

A determinação dos parâmetros de deformabilidade é uma das mais-valias do ensaio quando comparado com outros ensaios in-situ de referência. O erro relativo associado ao módulo de deformabilidade confinado (M), que constitui o parâmetro de deformabilidade mais largamente utilizado no contexto do ensaio, evidencia valores que podem atingir 80% no caso de solos argilosos, 15% nos caso restantes tipos solos. Os valores médios nestes casos são, respectivamente 20%, e inferior a 5%. Relativamente ao módulo distorsional (G_0), os valores máximos são mais elevados do que no caso anterior, verificando-se que a correlação de Cruz et al. (2006), apresentam melhores condições de avaliação nos solos granulares e a correlação de Hryciw (1990) evidencia menor grandeza de erro relativo nos solos finos. Em ambos os casos, verifica-se que os valores médios dos erros relativos são inferiores a 10%, com excepção dos solos argilosos com percentagens a variar entre 20 e 30%.

No contexto dos parâmetros de deformabilidade em solos argilosos, dado que o erro relativo pode ter impacto na avaliação paramétrica, procedeu-se a uma simulação de todos os ensaios, assumindo uma divisão de escala de 10 milibares em vez dos 50 milibares habitualmente utilizados nos equipamentos de medição. Os resultados evidenciam uma melhoria substancial nas aproximações do erro relativo, tomando valores inferiores a 10% para os casos de M e G_{0C} (Cruz et al., 2006).

6.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para avaliar se existe uma diferença estatisticamente significativa nas aproximações do erro relativo dos parâmetros geotécnicos em função do tipo de solo, abordaram-se dois modelos: o teste ANOVA e o teste Kruskal-Wallis.

O tamanho da amostra apresenta-se no Quadro 6.9.

Quadro 6.9 – Quantidades de dados utilizada na análise estatística.

Grupo	Número de leituras	Número de observações
Arenoso	1692	8111
Areno-siltoso	1421	6568
Silto-arenoso	1194	5575
Siltoso	297	1390
Sito-argiloso	328	1300
Argilo-siltoso	608	2269
Argiloso	2172	7770
Total	7712	32983

A análise de variâncias (ANOVA) implica vários pressupostos, entre os quais o de “variâncias semelhantes”. Este pressuposto foi testado através do Teste de Bartlett (com auxílio de uma subrotina criada por A. Trujillo-Ortiz e R. Hernandez-Walls, presente no ANEXO III), o qual avalia a igualdade de variâncias entre amostras de diferentes tamanhos, ou seja, verifica se existe homoscedaticidade (igualdade de variâncias).

Os resultados do teste para, os parâmetros abordados de seguida, indicam que não existe homoscedaticidade entre as amostras e consequentemente inviabiliza a utilização do teste ANOVA. Por esta razão, optou-se por usar o teste Kruskal-Wallis, um teste não paramétrico e não necessita de requisitos tão fortes para ser utilizado.

6.3.1. PARÂMETROS BÁSICOS

Inicialmente foram verificadas as distribuições dos erros relativos dos índices do ensaio com o tipo de solo, visto que, os parâmetros geotécnicos dependem destes.

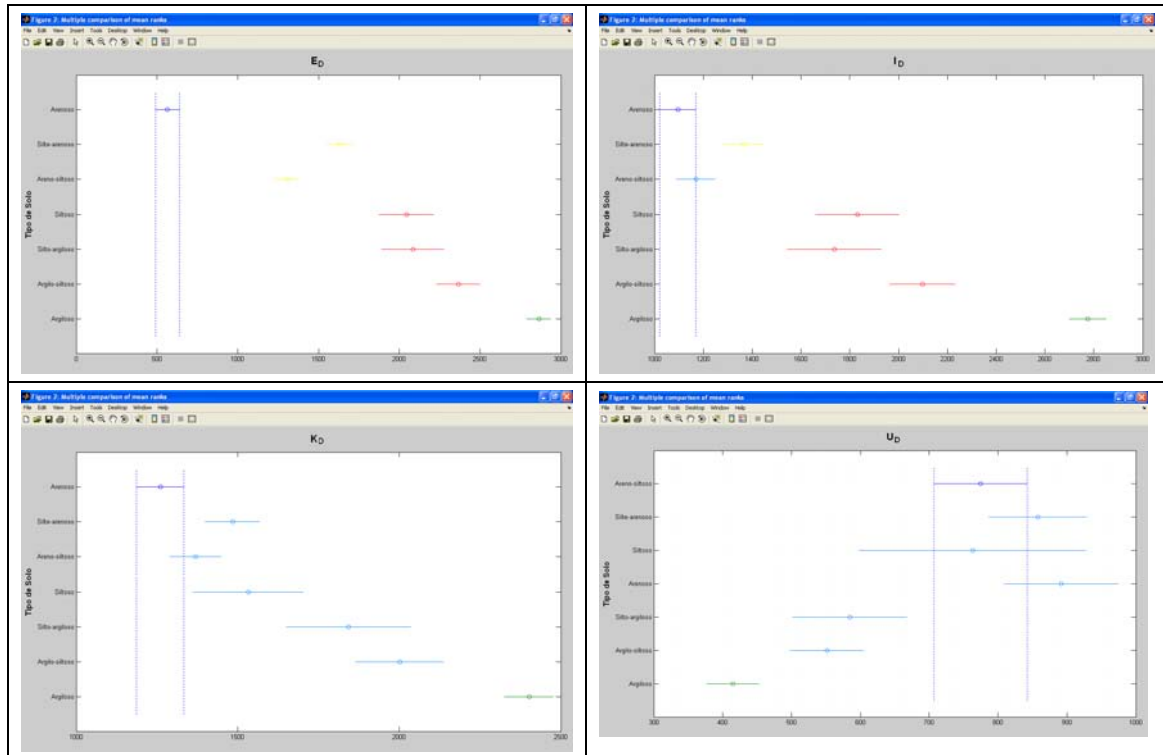


Figura 6.1 – Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) dos índices do ensaio.

Pela observação da Figura 6.1 (gráficos dos índices E_D e I_D) verifica-se que os tipos de solos arenosos e argilosos apresentam diferenças estatisticamente significativas, em termos do erro relativo, ao passo que nos restantes tipos de solos não são detectadas essas diferenças através deste teste.

No entanto, e em função do acima exposto, parece razoável a identificação de “clusters” como evidencia o Quadro 6.10.

Quadro 6.10 – Interpretação da análise estatística dos índices E_D e I_D (Figura 6.1).

Erro relativo médio	Tipo de solo	“cluster”
menor	arenoso	1
↓	silto-arenoso	2
	areno-siltoso	
	siltoso	3
	silto-argiloso	
	argilo-siltoso	
maior	argiloso	4

Nos gráficos dos Índices de tensão horizontal e tensão intersticial, todos os tipos de solos à exceção dos solos argilosos não apresentam diferenças estatisticamente significativas no que diz respeito ao erro relativo. O Quadro 6.11 enumera os possíveis “cluster” referentes aos dois índices em causa.

Quadro 6.11 - Interpretação da análise estatística dos índices K_D e U_D (Figura 6.1).

	K_D	U_D	
Erro relativo médio	Tipo de solo	Tipo de solo	“cluster”
menor	arenoso	argiloso	1
↓	silto-arenoso	argilo-siltoso	
	areno-siltoso	silto-argiloso	
	siltoso	silto-arenoso	
	silto-argiloso	arenoso	
	argilo-siltoso	areno-siltoso	
maior	argiloso	Siltoso	4

6.3.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas do solo são também factores que estão presentes no cálculo de determinados parâmetros. Sendo assim, foi executada a análise estatística para a baridade e tensão efectiva vertical do solo (ver Figura 6.2).

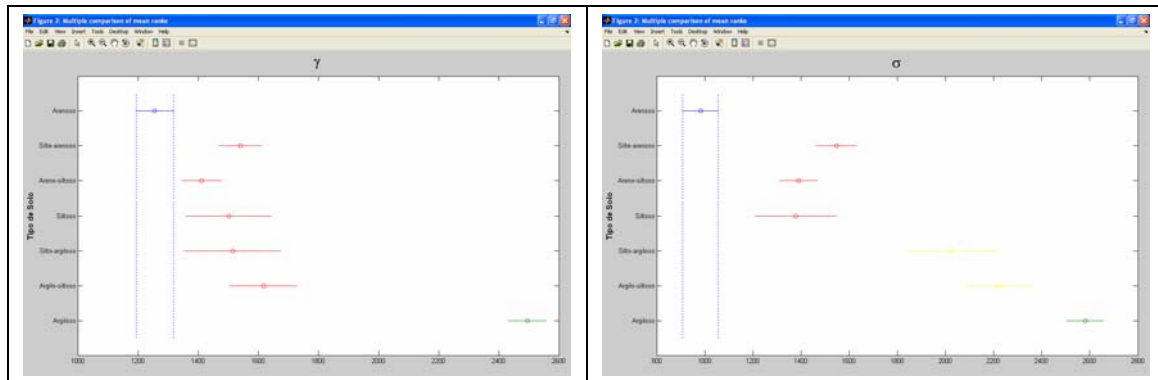


Figura 6.2 - Gráficos de análise estatística (Krusjalwallis) das propriedades físicas do solo.

Os erros relativos associados à baridade e à tensão efectiva do solo apresentam distribuição idêntica aos índices E_D e I_D , havendo diferenças estatisticamente significativas nos tipos de solos arenosos e argilosos, enquanto que nos restantes não são detectadas essas diferenças. No entanto é ponderado identificar vários “cluster”, como se apresenta no Quadro 6.12.

Quadro 6.12 - Interpretação da análise estatística dos índices γ e σ'_v (Figura 6.2).

	γ	σ'_v	
Erro relativo médio	Tipo de solo	Tipo de solo	“cluster”
menor	arenoso	arenoso	1
↓	silto-arenoso	silto-arenoso	2
	siltoso	siltoso	
	silto-argiloso	areno-siltoso	3
	areno-siltoso	silto-argiloso	
	argilo-siltoso	argilo-siltoso	
maior	argiloso	argiloso	4

6.3.3. PARÂMETROS ESTADO E HISTÓRIA DE TENSÕES

Quanto à história e estado de tensões, verificam-se comportamentos distintos (Figura 6.3, a) e b)).

Em relação ao parâmetro coeficiente de impulso em repouso, o seu erro relativo apresenta diferenças estatisticamente significativas (idênticas aos índices de ensaio E_D e I_D), com a separação nítida de solos arenosos e argilosos.

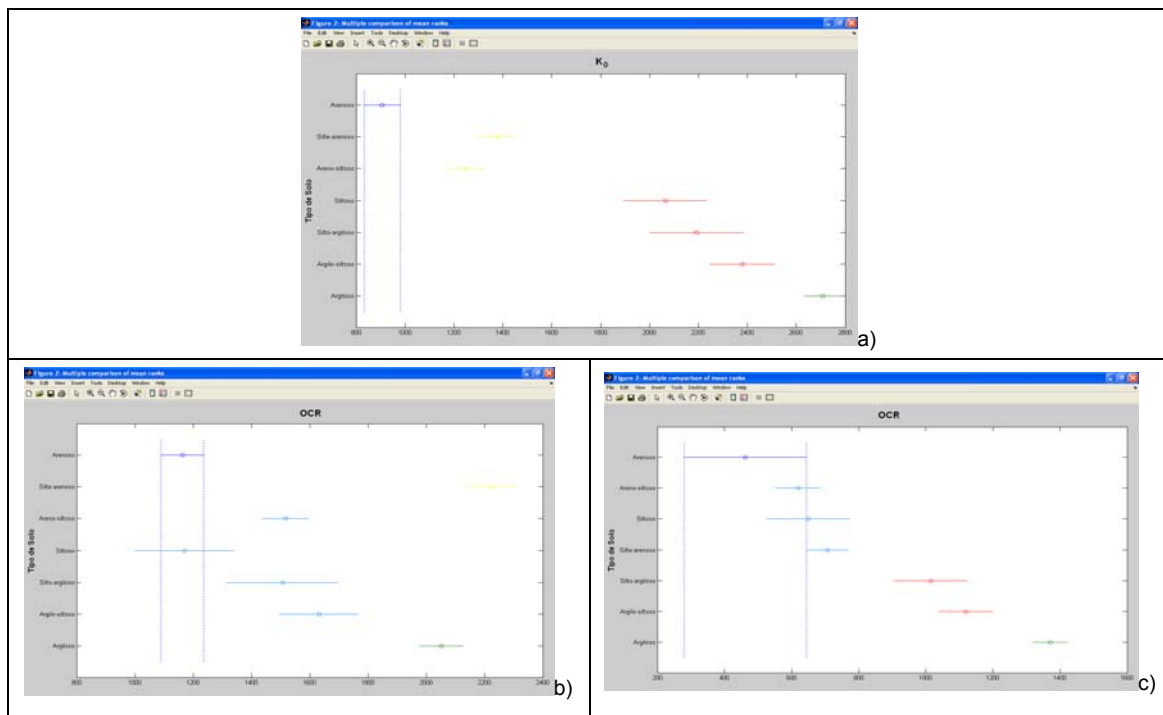


Figura 6.3 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-Wallis) dos parâmetros de estado e história de tensões.

Por outro lado, o grau de sobreconsolidação apresenta diferenças estatisticamente significativas idênticas ao índice de tensão horizontal, na qual se observa diferença significativa nos solos argilosos.

A identificação de “clusters” dos parâmetros K_0 e OCR apresenta-se no Quadro 6.13.

Quadro 6.13 - Interpretação da análise estatística dos de estado e história de tensões (Figura 6.3 a) e b)).

	K_0		OCR	
Erro relativo médio	Tipo de solo	“cluster”	Tipo de solo	“cluster”
menor	arenoso	1	arenoso	1
↓	siltos-arenoso	2	siltoso	2
	areno-siltoso		siltos-arenoso	
	siltoso	3	siltos-argiloso	
	siltos-argiloso		argilos-siltoso	
	argilos-siltoso		argiloso	3
maior	argiloso	4	areno-siltoso	4

Uma vez que, OCR tem aplicabilidade essencialmente nos solos argilosos e residuais, como já foi referido na secção referente à análise dos parâmetros geotécnicos na propagação do erro, verificou-se o resultado deste tipo de análise tendo em conta estes dois agrupamentos (ver Figura 6.3 c)). O resultado evidenciou que só os solos argilosos é que apresentam diferenças estatisticamente significativas. A análise em termos de “clusters” apresenta-se no Quadro 6.14.

Quadro 6.14 - Interpretação da análise estatística do OCR para os agrupamentos de solos Sedimentares argilosos e Residuais (Figura 6.3 c)).

Erro relativo médio	Tipo de solo	“cluster”
menor	arenoso	1
↓	areno-siltoso	2
	siltos-arenoso	
	siltoso	
	siltos-argiloso	3
	argilos-siltoso	
maior	argiloso	4

A análise relativa aos parâmetros de deformabilidade (Módulo de deformabilidade confinado) está representado na Figura 6.4, onde é possível observar que os solos arenosos e argilosos mantêm diferenças estatisticamente significativas (embora seja possível que alguns solos apresentem comportamento semelhantes em relação a este parâmetro, e assim foram seleccionados os seguintes “clusters”, ver Quadro 6.15).

Quadro 6.15 - Interpretação da análise estatística do parâmetro de deformabilidade confinado, M (Figura 6.4).

Erro relativo médio	Tipo de solo	“cluster”
menor	areno-siltoso	1
	siltoso-arenoso	
	siltoso	
	siltoso-argiloso	
↓	arenoso	2
	argilo-siltoso	3
	maior	4
	argiloso	4

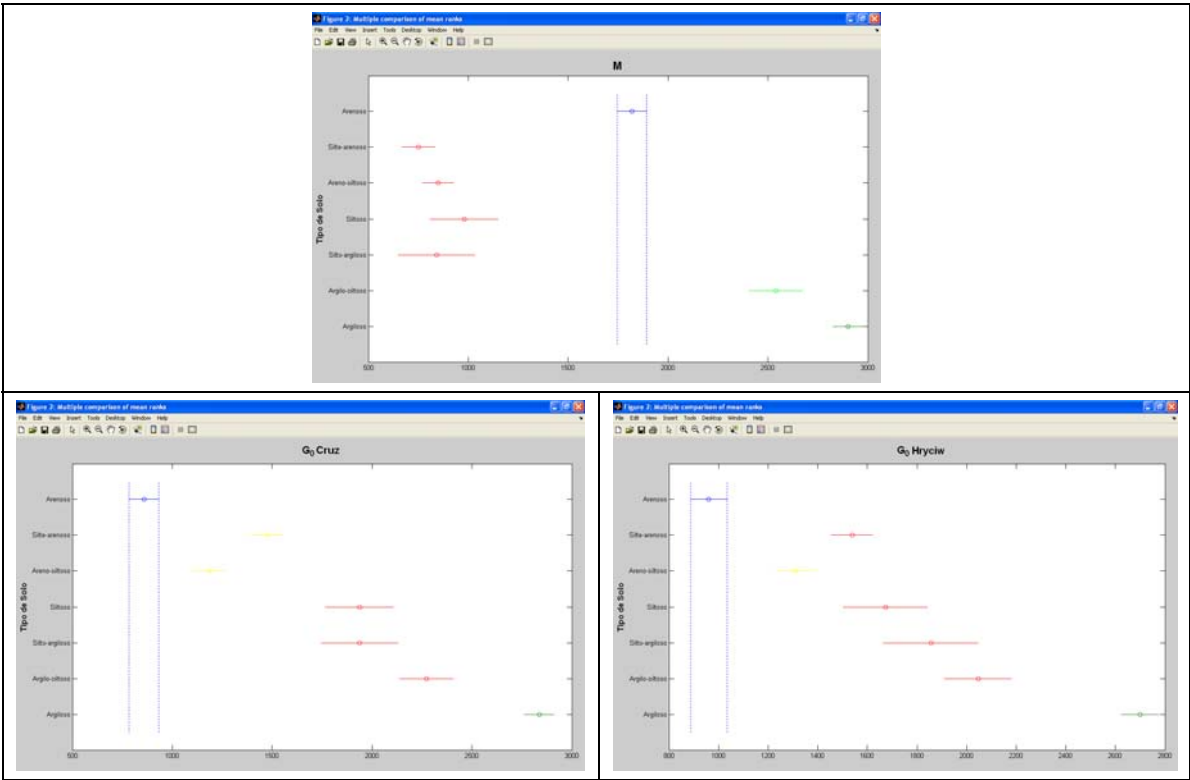


Figura 6.4 - Gráficos de análise estatística (Kruskal-wallis) dos parâmetros de deformabilidade.

E por último, na análise do módulo distorsional, verifica-se diferenças estatisticamente significativas nos solos arenosos e argilosos. O Quadro 6.16 apresenta os “clusters” identificados para as duas correlações deste parâmetro.

Quadro 6.16 - Interpretação da análise estatística do parâmetro de deformabilidade distorsional (Figura 6.9).

	G₀ Cruz	G₀ Hryciw	
Erro relativo médio	Tipo de solo	Tipo de solo	“cluster”
menor	arenoso	arenoso	1
	silto-arenoso	silto-arenoso	2
	areno-siltoso	areno-siltoso	
	siltoso	siltoso	3
	silto-argiloso	silto-argiloso	
	argilo-siltoso	argilo-siltoso	
maior	argiloso	argiloso	4

6.4. EVOLUÇÃO DO ERRO RELATIVO MÉDIO COM DIFERENTES ORDENS DE GRANDEZA DE PRECISÃO DAS LEITURAS MANOMÉTRICAS

Adicionalmente á verificação dos erros nas leituras do ensaio DMT, como também a sua propagação, foram processados os mesmos dados para diferentes precisões de leituras manométricas. O quadro seguinte apresenta as precisões tidas em conta para esta análise.

Definição	Menor escala (bar)	Erro de leitura (bar)
Grosseira	0.1	0.05
Referência	0.05	0.025
Melhor precisão	0.01	0.005
Óptima precisão	0.005	0.0025

A análise do comportamento do erro relativo médio em função da precisão das leituras manométricas evidenciou alguns aspectos que se destacarão em seguida.

Nota: as rectas dos gráficos são aproximações de interpolações de ligação entre pontos, não nos indica necessariamente o valor exacto.

6.4.1. PARÂMETROS BASICOS

A Figura 6.5 evidencia dois tipos de comportamento nos três parâmetros básicos e na diferença de pressões:

1. aterros e solos residuais – o erro aumenta significativamente na passagem da precisão de 0.0025 para 0.005, mantendo-se estável a 0.025. Se a precisão for de 0.05 o erro aumenta 1 a 2% em relação a 0.025 de precisão, nos solos residuais e aterros, respectivamente.
2. solos sedimentares argilosos e arenosos – apresentam um aumento, linear, do erro com a diminuição da precisão leitura manométrica.

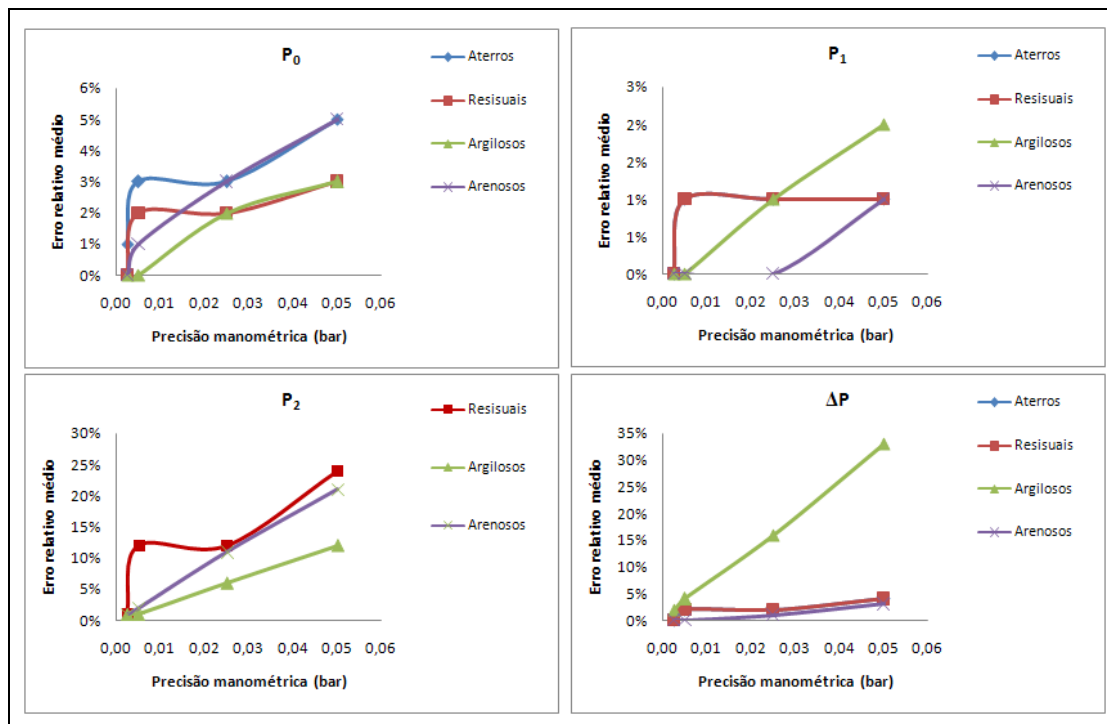


Figura 6.5 – Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros básicos.

6.4.2. PARÂMETROS INTERMÉDIOS

Na Figura 6.6 apresentam-se os gráficos associados aos parâmetros intermédios.

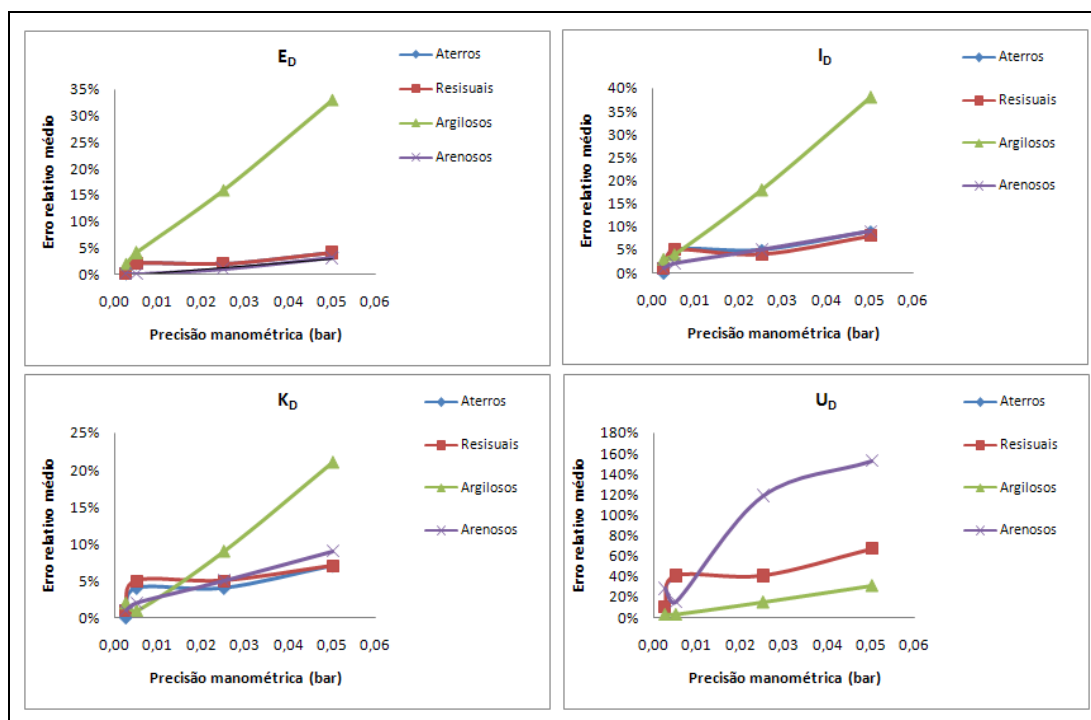


Figura 6.6 - Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros intermédios.

Quanto aos parâmetros básicos do ensaio verifica-se, globalmente, o mesmo comportamento.

6.4.3. PARÂMETROS FÍSICOS E DE ESTADO E HISTÓRIA DE TENSÕES

Na Figura 6.7 apresentam-se os gráficos associados aos parâmetros físicos e de estado e história de tensões.

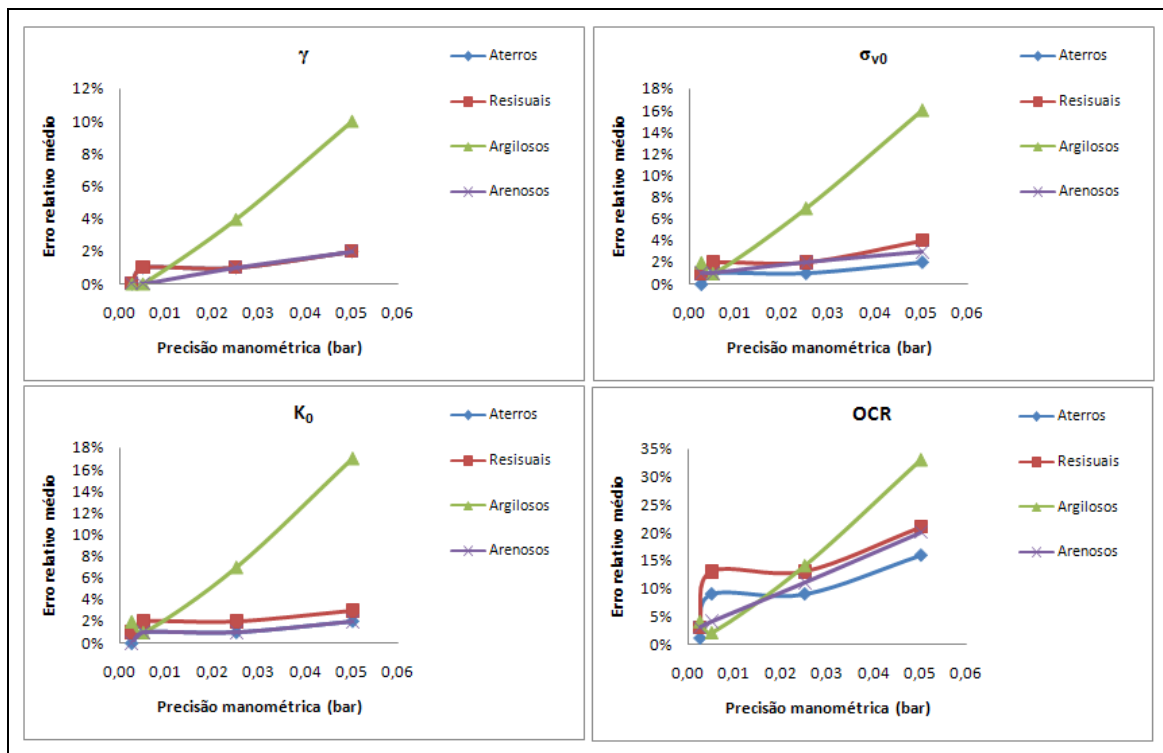


Figura 6.7 - Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros de propriedades físicas e estado e história de tensões do solo.

Tal como nos casos anteriores, os parâmetros associados ao estado físico e história de tensões exibem idêntico comportamento.

6.4.4. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Na Figura 6.8 apresentam-se os gráficos associados aos parâmetros de resistência.

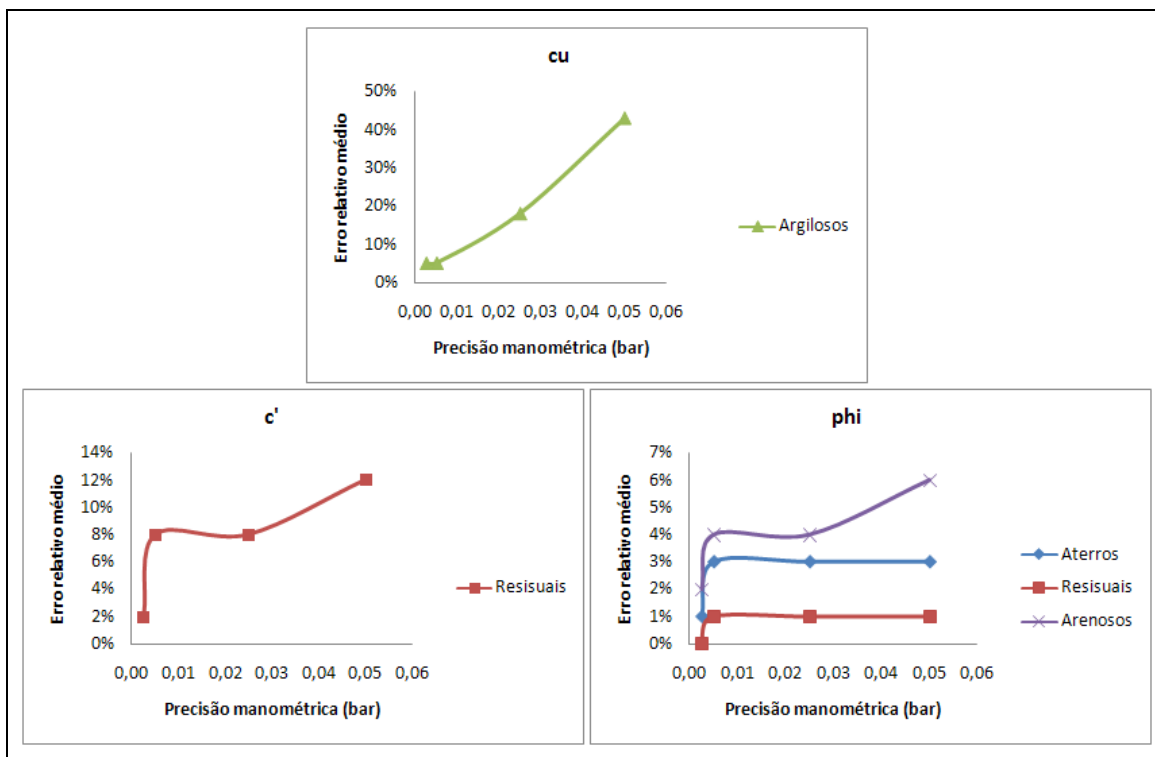


Figura 6.8 - Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros de resistência.

No caso dos parâmetros de resistência, a variação do erro com a pressão manométrica depende do tipo de resistência a determinar (drenada ou não drenada). Assim, em solos argilosos (resistência não drenada), verifica-se um crescimento linear do erro relativo médio com a diminuição da precisão. Em solos arenosos (resistência drenada) existe uma diferença de comportamento consoante se tratar de aterros e solos residuais ou solos transportados. Com efeito, em aterros e solos residuais há um crescimento significativo do erro na passagem das precisões 0,0025 para 0,005, mantendo-se estável a partir deste valor, enquanto em solos arenosos transportados se verifica um comportamento idêntico somente até classes de precisão de 0,025. A partir deste valor o erro aumenta com a diminuição da precisão.

6.4.5. PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE

Na Figura 6.9 apresentam-se os gráficos associados aos parâmetros de deformabilidade.

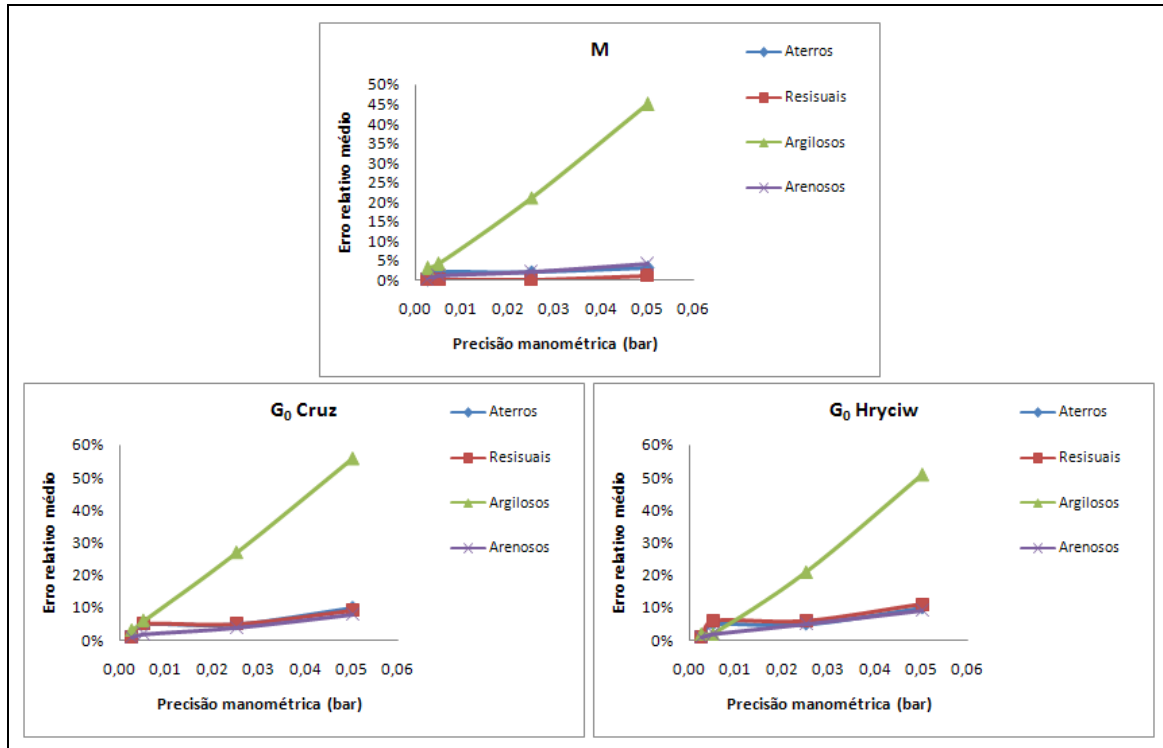


Figura 6.9 - Gráficos de erro relativo médio dos parâmetros de deformabilidade.

Por último, o erro relativo médio dos parâmetros de deformabilidade exibe uma evolução idêntica aos verificados no caso dos parâmetros básicos.

Capítulo 7. Conclusões

7. CONCLUSÕES

7.1. PROPAGAÇÃO DE ERROS

O estudo realizado revela a importância da realização de análises de propagação de erros no domínio do controlo de qualidade de resultados de ensaios e da selecção de parâmetros de referência que traduzam com eficiência o comportamento mecânico dos maciços em estudo.

O estudo realizado sobre o ensaio DMT revelou alguns aspectos que importa destacar:

Precisão adequada dos equipamentos de medição para as pressões fundamentais (P_0 e P_1), o que se reflecte em aproximações dos majorantes do erro relativo médios inferiores a 5%. As pressões intersticiais reflectidas através da pressão P_2 apresentam intervalos de erro relativo mais acentuados quando os valores da medição são baixos.

As determinações da posição do nível freático e das profundidades de leitura deverão ser efectuada com precisão da ordem do decímetro para reduzir os valores dos erros associados aos parâmetros em que u_0 se encontra representado. Precisão de leitura de ordem superior não se traduzem em melhorias significativas (Cruz et al, 2008).

A avaliação do tipo de solo através do parâmetro I_D , revela-se de precisão adequada, em que a influência do erro não introduz alterações significativas.

Relativamente aos parâmetros geotécnicos verifica-se que os erros relativos máximos associados às determinações do peso volúmico, tensões verticais, coeficiente de impulso em repouso e ângulo de resistência ao corte são inferiores a 20%, com médias inferiores a 10%, garantindo impactos insignificantes nos parâmetros seleccionados para projecto.

Nos casos em que os valores máximos do erro relativo podem ultrapassar 20% (OCR, c' , M e G_0) os valores médios situam-se globalmente abaixo dessa barreira (15%) com excepção dos parâmetros de deformabilidade (G_0 e M) em solos argilosos que variam entre 20 e 30%.

Considerando que os valores dos parâmetros de referência neste ensaio são atribuídos pela média dos valores associados a cada unidade particular é razoável admitir o valor médio como representativo. Em consequência, na generalidade os erros relativos traduzem impacto pouco significativo na avaliação dos valores de referência para dimensionamento.

No caso particular dos parâmetros de deformabilidade em solos argilosos (G_0 e M), os eventuais problemas gerados por valores de erro relativo médios superiores a 20% podem ser baixados através do aumento da precisão das leituras manométricas, com menor divisão de escala de 10 mbares.

7.2. COMPORTAMENTO DO MAJORANTE DO ERRO NOS DIFERENTES TIPOS DE SOLO

Os resultados da análise descrita em 5.3 permitiram-nos concluir que existe um comportamento diferenciado do erro relativo em função do tipo de solo. Na globalidade verifica-se que os solos do tipo arenoso e argilosos apresentam diferenças estatisticamente significativas, ao passo que nos restantes tipos de solos não foram detectadas essas diferenças através do teste Kruskal-Wallis.

Em consonância com o que está escrito acima, parece admissível a hipótese de alguns tipos de solos terem comportamentos semelhantes e poderem ser definido pelos seguintes “clusters”:

1. arenosos;
2. areno-siltosos e silto-arenosos;
3. siltosos, silto-argilosos e argilo-siltosos;
4. argilosos.

Além disso, no caso de alguns parâmetros, o “cluster” 2 pode ser agrupado ao “cluster” 1 (o caso de I_D e OCR) ou ao “cluster” 3 (γ , M e G_0), formando um só grupo.

Finalmente, verifica-se que os valores dos erros relativos associados aos parâmetros deduzidos com ensaio com o DMT dependem do tipo de solo, observando-se um aumento global do mesmo na passagem de solos granulares para solos finos.

7.3. EVOLUÇÃO DO ERRO RELATIVO MÉDIO COM A PRECISÃO DAS LEITURAS MANOMÉTRICAS

No que respeita à selecção de uma precisão manométrica adequada, verifica-se que globalmente o valor do erro diminui com o aumento da precisão. Neste contexto, a precisão actualmente utilizada é boa para os casos de aterros, solos arenosos transportados e solos residuais, enquanto em solos argilosos é recomendável o aumento da precisão para 10 milibares, que reduziriam os valores médios do erro respectivo para um limite desejável inferior a 10% (como já foi referido).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado visou a avaliação da ordem de grandeza da aproximação do majorante do erro associado às leituras efectuadas no ensaio com o dilatómetro de Marchetti e consequentemente a sua propagação na determinação dos parâmetros geotécnicos. Com este objectivo, o estudo incidiu num variado leque de ensaios, executados em diferentes locais com características de formação e origem distintas.

Numa primeira abordagem a análise de erros, como a sua propagação, foi realizada em termos dos majorantes do erro absoluto, com base na fórmula fundamental da teoria de erros. Verificou-se que, globalmente, a aproximação do majorante do erro reproduz um erro relativo médio, na maior parte dos casos, com impacto pouco significativo, na avaliação dos valores de referência para dimensionamento.

Embora o erro relativo médio obtido na globalidade dos parâmetros geotécnicos tenha sido reduzido, traduzindo uma boa fiabilidade dos resultados do ensaio, verificou-se que o erro tem comportamento diferenciado com o tipo de solo (determinado por I_D), sendo os resultados de pior qualidade associados a solos argilosos, sobretudo para valores de I_D inferiores a 0.1.

Parece ainda oportuno referir que os parâmetros obtidos a partir do ensaio com dilatómetro de Marchetti evidenciam uma qualidade globalmente elevada, uma vez que em geral os erros se traduzem em impactos insignificantes no dimensionamento. Embora não existam estudos deste género para os ensaios “in situ”, acredita-se que os resultados obtidos para o presente ensaio dificilmente serão atingidos nos restantes.

Finalmente, importa referir a relevância deste tipo de avaliações em todos os ensaios (“in situ” e laboratoriais) utilizados no dimensionamento corrente, pelo que se sugere a sua abordagem em futuro próximo.

Referências bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Marchetti, S., Pasqualini, E. (1986). "Flat Dilatometer Test in Calibration Chambers". Proc. of IV Conference in use of In Situ Test. Blacksburg, Virginia, ASCE, pp. 431-446.

Baligh, M. M., Scott, R. F. (1975). "Quasi Static Deep Penetration in Clays. ASCE Jnl GE, Vol. 101, No. GT11, pp. 1119-1113

Campanella, R. G. (1983) "Current Research and Development of the Flat Dilatometer". First International Conference on the Flat Dilatometer. Edmonton, Alberta.

Cardoso, M., Casaca, A., Moreira, M.(2004) "Elementos de apoio aos trabalhos práticos de mecânica geral". Sebenta da disciplina de Mecânica Geral. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Cruz, N. (1995). "A avaliação de Parâmetros Geotécnicos pelo Dilatómetro de Marchetti". Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra.

Cruz, N., Viana da Fonseca, A., (1997). "Caracterização de Maciços Terrosos a partir da Utilização Conjunta de Ensaio DMT e CPT(U)." 9º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa.

Cruz, N., Figueiredo, S., Viana da Fonseca, A. (2004a). "Deriving geotechnical parameters of residual soils from granite by interpreting DMT+CPTU tests. Geotechnical and Geophysical Site characterization, Viana da Fonseca, A. e Mayne, P. W. (eds.) Millpress, Rotterdam, pp. 1799-1803.

Cruz, M., Viana da Fonseca, A., Neves, E. (2004b). Evaluation of effective cohesive intercepto n residual soils by DMT data Geotechnical Site Characterization. Proc. Of ISC2. Ed. Viana sa Fonseca & Mayne. Milpress Pub. Netherlands.

Cruz, N., & Viana da Fonseca, A. (2006a). "Portuguese experience in residual soil characterization by DMT tests." *Proc. 2nd International Flat Dilatometer Conference*, Washington

Cruz, N., Devincenzi, M.; Viana da Fonseca, A. (2006b). "DMT experience in Iberian transported soils." *Proc. 2nd International Flat Dilatometer Conference*, Washington, pp. 198-204.

Cruz, N., Mateus, C., Cruz, M., Cruz, I. (2008) "Determinação dos erros de medição associados a ensaios "In Situ". O caso do Ensaio DMT." XI - Congresso Nacional de Geotécnia", Coimbra.

Dahlquist, G., Björck, Å. (1974). *Numerical Methods* – Translated by Anderson. George Forsythe, editor, pp. 21-32

Devincenzi, M., Marchetti, S. (2002). "El ensayo dilatómetro de Marchetti". *Geotecnia 2002* (in Espanhol).

Durgunoglu, H. t., Mitchell, J. K. (1975). "Static Penetration Resistance of Soils, I – Analysis, II – Evaluation of the Theory and Implications for Practice". *ASCE Spec. Conf. on "In Situ Measurement of Soil Properties"*, Raleigh, NC, Vol. 1.

Eurocode 7, (1997) "Geotechnical Design. Part 3: Design assisted by field tests, Section 9: Flat Dilatometer Test (DMT). Final Draft, ENV 1997-3, Apr., 66-73. CEN – European Committee For Standardization.

Fisher, R. A. (1935). "The logic of inductive inference". *Journal of the Royal Statistical Society Ser. A.*, 98: 39-54.

Gemael, C. (1984). "Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas". *Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR*, 1ª Edição.

Gravesen, S. (1960). "Elastic Semi-Infinite Medium Bounded by a Rigid Wall with a Circular Hole". *Laboratoriet for Bygningsteknik, Danmarks Tekniske Højskole*, Meddelelse No. 10, Copenhagen.

Haynes, J. A. (1983). "Case Histories Involving the Flat Dilatometer". *First International Conference on the Flat Dilatometer*. Edmonton, Alberta.

Hardin, B. O., Blandford, G. E. (1989). "Elasticity of particulate materials. J. Geotechnical. Eng. Div. ASCE, pp. 115 (6), 788-805.

Hryciw, R.D. (1990). "Small-strain-shear modulus of soil by dilatometer." *Journal of Geotechnical Eng. ASCE*, Vol 116, N°11, pp.1700-1716.

Jamiolkowski, B. M., Ladd, C. C., Jermaine, J. T., Lancelotta, R. (1985). "New developments in field and laboratory testing of soils", Theme lecture, Session II,XI ISCMFE, Proceedings, Vol.1, S. Francisco, CA,. pp. 57-153.

Jamiolkowski, B. M., Robertson, P. K. (1988). "Future trends for penetration testing. Closing Address". Penetration Testing in United Kingdom Geotechnical Conference. British Institution of Civil Engineers. Thomas Telford, London. pp. 321-342.

Johnson, R. A., Bhattacharyya, G. K. (1987). "Statistics – Principles and Methods". 2^a Edition. John Wiley & Sons. Inc.

Johnson, R. A., Wichern, D. W. (1998). "Applied Multivariate Statistical Analysis". 4^a Edition. Prentice-Hall, Inc. United States of America.

Lacasse, S., Lunne, T. (1988). "Calibration of Dilatometer Correlations". Proc. ISOPT-1, Florida. Vol. 1, pp. 539-548.

Ladd, C. C. (1991). "Stability evaluation during staged construction". J. Geotech. Engrg, Div., Vol. 117, pp. 540-615.

Lutenegger, A. J. (1988). "Current Status of the Marchetti Dilatometer Test". I Int. Symposium on Penetration Testing, Orlando.

Lutenegger, A. J., Kabir, M. G. (1988). "Dilatometer C-reading to help determine stratigraphy". Proc. ISOPT-1, Orlando, FL, Vol. 1, 549-554.

Kruskall, W. H., Wallis, W. A. (1952). "Use of ranks in one-criterion variance analysis". Psychometrika. 29: 115-129.

Mayne, P. W., Asce, A. M., Kulhawy, F. H., Asce, M., (1982). " K_0 – OCR Relationships in Soil". J. Geotech. Engrg. Div., GT6, pp. 851-873.

Marchetti, S. (1980). "In Situ test by Flat Dilatometer". Jnl. Geotech. Engrg. Div., Vol 106, No 3, Mar, pp. 299 – 321. ASCE, New York.

Marchetti, S. & Crapps, D. K. (1981). "Flat Dilatometer Manual". *Internal Report of G.P.E. Inc.*, distributed to purchasers of DMT equipment.

Marchetti, S. (1985) "On the Field Determination of K_0 in Sand". XI Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 5. S. Francisco.

Marchetti, S. (1997). "The Flat Dilatometer: Design Applications" *Proc. 3rd Int. Geotechnical Engennering Conf. Cairo University*.

Marchetti, S. (1999). "On the Calibration of teh DMT Membrane". Internal Technical Note, Draft 28 March 199. L'Aquila University, Italy.

Marchetti, S. e Monaco, P. (2001) "DMT Course Notes", Short Course on Flat Dilatometer (DMT), Bali Insitu 2001.

Marchetti S., Monaco P., Totani G. & Calabrese M. (2001). "The Flat Dilatometer Test (DMT) in soil investigations." *Report of the ISSMGE Technical Committee 16. Int Conf. On In situ Measurement of Soil Properties*, Bali, Indonesia. Document also available in *Proc. 2nd International Flat Dilatometer Conference*, Washington (2006).

Maroco, J. (2007). " Análise Estatística com utilização de SPSS".3ª Edição, Edições Sílabo, Lisboa.

Mason, R. L., Gunst, R. F., Hees, J. L. (2003). "Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science". 2ª Edition. John Wiley & Sons. Inc.

Matos Fernandes, M. (1994). "Mecânica dos solos". Apointamentos da disciplina de Mecânica dos solo, Volume I. FEUP.

Mendonça, F. (2000). "O ensino da topografia associado à teoria dos erros". Sebenta da Disciplina de Topografia, do Departamento de engenharia Cartográfica – UFPE.

Mesri, G., Feng, T.W. e Shahien, M. (1999). "Coefficient of Consolidation by Inflection Point Method". *ASCE Jnl GGE*, Vol.125, No.8, Aug., 716-718-

Powell, J.J. M., Uglow I.M. (1988). "The Interpretation of the Marchetti Dilatometer Test in UK Clays". Penetration testing. Institution of Civil Engineers, British Geotechnical Conference, Birmingham.

Reis, E. (1997). " Estatística Multivariada Aplicada". Edições Sílabo, Lisboa.

Robertson, P. K. (1989) "Soil classification using the penetration test". *Canadian Geot. J.*, Vol. 27, pp. 151-158.

Robertson, P., Campanella, R. (1983). "International os Cone Penetrometer test: Part I – Sand". Canadian Geotech. J., 10, pp. 718-733.

Roque, R, Jambu, N., Senneset, K. (1988). "Basic Interpretation Procedures os Flat Dilatometer Tests". Penetration Testing, ISOPT-1. Orlando, 1988.

Rose, Van, S. (1994). "A Terra - Visual Ciência". Editorial Verbo; Lisboa.

Schmertmann, J. H. (1976). "Measurement of In Situ Shear Strength". Proc. ASCE Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, Vol II, 58 – 138.

Schmertmann, J. H. (1981). "In situ Test by Flat Dilatometer". J. Geotech. Engrg. Div., Vol 107, GT6.

Schmertmann, J. H. (1983). "Revised Procedure to Calculate K_0 and OCR from DMT's with I.D. » 1.2". DMT Digest #1, GPE Inc., Gainesville, Fla.

Schmertmann, J. H. (1988). "Dilatometers Sttle In". Civil Engineerin, ASCE. Blacksburg, VA.

Sneath, P. H., Sokal, R. R. (1973). "Numerical Txonomy, W. H. Freeman.

Sokal, R. R., Sneath, P. H. (1963). "Principles of numerical taxonomy, Ed. W.H. Freeman.

Strout, J. M. (1993). "Sensivity Analysis od the Correlations for the Dilatometer Test en Cohesionless Soils". Master of Science In Civil Engineering. University of Washington.

Sully, J. P., Campanella, R. G. (1989). "Correlation of Maximum Shear Modulus with DMT Test results in Sands". Proc XII ISCMFE, R. Janeiro, Vol. 1, pp. 339-343.

Systat (1992). "Systat for Windows. Statistics, 5 ed.,. Systac Inc., Evanston.

Takana, H. & Takana, M. (1998). "Caracterization of Sandy Soils using CPT and DMT. Soils and Foundations, Japanese Geot. Soc., Vol. 38, No. 3, 55 – 65.

Totani, Marchetti, Monaco, Calabrese (2001) "Use of the Flat Dilatometer Test (DMT) in Geotechnical Design". IN SITU 2001, Intl. Conf. On In situ Measurement of Soil Properties, Bali, Indonesia.

Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ottuño, L.; Oteo, C. (2002). "Ingeniería Geológica", pp 176-262; 439-459; 615-638, Pearson Educación, Madrid.

Viana da Fonseca, A., Vieira, F., Cruz, N. (2001). "Correlations between SPT, CPT, DP, DMT, CH and PLT Test Results on Rypical Profiles of Saprolitic Soils from Granite". International Conference on In Situ Measurement of Soil Properties and case Histories. Baldi, Indonésia.

Viana da Fonseca, A., & Cruz, N. (2007). "Geotechnical Characterization by in situ and Lab Tests to the Back-Analysis of a Supported Excavation in Metro do Porto." *Proc. 1st Siri Lankan Conference*, Sri Lanka.

Virella, F. A., Serrano, F. M. (1993). " Processos Geológicos Externos y Geología Ambiental". Editorial Rueda, Madrid.

Bibliografia electrónica

Marchetti Site – "Flat Dilatometer (DMT) downloadable papers". by Prof. S. Marchetti

<http://www.marchetti-dmt.it/>

Acedido: 3 de Março; 20 de Maio; 14 de Junho de 2008

Centic – Ciências Naturais e TIC, Tema – Solo da autoria José Salsa, 2004.

Acedido em: 1de Março de 2008

<http://www.cientic.com/>

Universidade do Minho – Departamento de Física "Elementos da teoria de erros".

<http://www2.fisica.uminho.pt/Topicos%20de%20Fisica/Elementos%20de%20teoria%20de%20erros.htm>

Acedido em: 1 de Março de 2008

ANEXO I

Código Geral

```
clear A deltaA B deltaB C NF AA nl Res P0 P1 P2 deltaP Ed Id kd u0 zi
z1 Ud sigmav0 sigmav0l gama k0 OCR OCR1 M cu phi gamal u1 gamatop
sigmatop u0ini c phic phic1 phisigmav0 G0C G0H G0H1 sigmatotaltop
sigmatotal sigmatotall

syms A deltaA B deltaB C NF AA nl Res P0 P1 P2 deltaP Ed Id kd u0 zi
z1 Ud sigmav0 sigmav0l gama gamaw k0 OCR OCR1 M cu phi gamal u1
gamatop sigmatop u0ini c phic phic1 phisigmav0 G0C G0H G0H1
sigmatotaltop sigmatotal sigmatotall

%Atenção: d_nomedavariavel é o majorante do erro da variavel
% v_nomedavariavel é o valor da variavel
% Dados iniciais
vD=60
dD=1e-2
dA=5e-2/2
ddeltaA=dA
dB=5e-2/2
ddeltaB=dB
dC=5e-2/2
vd0=0.05
dd0=2e-2
vd1=1.1
dd1=2e-2
vx=pi %pi
dx=0.5e-14
vgamaw=0.098
dgamaw=1e-4
dz0=5e-3
dz1=5e-3
dзи=5e-3
dNF=5e-3
divgamal=1e-3;
dgamatop=0.1

%Calibrações iniciais
vdeltaA=input('valor de delta A')
vdeltaB=input('valor de delta B')
vNF=input('Nível freático')
vgamatop=input('valor de gama topo (Ton/m3)')
straux=input('Qual o intervalo de celulas a importar?')
('A Importar a matriz dos dados ...')
[AA,TXT,RAW]=xlsread('DadosD21',1,straux);
nl=size(AA,1);
Res=AA(:,1:4);
Tab=AA(:,1:4);
```

```

for i=1:nl

    %calcula P0
    P0=1.05*(A+deltaA)-0.05*(B-deltaB);
    Res(i,5)=double(subs(P0,{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB})); %P0
    Res(i,6)=abs(double(subs(diff(P0,A),{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))*dA...
    +abs(double(subs(diff(P0,deltaA),{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))*ddeltaA...
    +abs(double(subs(diff(P0,B),{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))*dB...
    +abs(double(subs(diff(P0,deltaB),{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))*ddeltaB;
    Res(i,7)=abs(Res(i,6)/Res(i,5)); %erro relativo

    %calcula P1
    P1=(B-deltaB);
    Res(i,8)=double(subs(P1,{B,deltaB},{Res(i,3),vdeltaB})); %P1
    Res(i,9)=abs(double(subs(diff(P1,B),{B,deltaB},{Res(i,3),vdeltaB}))*dB...
    +abs(double(subs(diff(P1,deltaB),{B,deltaB},{Res(i,3),vdeltaB}))*ddeltaB;
    Res(i,10)=abs(Res(i,9)/Res(i,8)); %erro relativo

    %calcula P2
    P2=(C+deltaA);
    if Res(i,4)==0
        Res(i,11)=0;
        Res(i,12)=0;
    else
        Res(i,11)=double(subs(P2,{C,deltaA},{Res(i,4),vdeltaA})); %P2
        Res(i,12)=abs(double(subs(diff(P2,C),{C,deltaA},{Res(i,4),vdeltaA}))*dC...
        +abs(double(subs(diff(P2,deltaA),{C,deltaA},{Res(i,4),vdeltaA}))*ddeltaA;
        Res(i,13)=abs(Res(i,12)/Res(i,11)); %erro relativo
    end

    %calcula deltaP=P1-P0
    deltaP=P1-P0;
    Res(i,14)=double(subs(deltaP,{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB})); %deltaP
    Res(i,15)=abs(double(subs(diff(deltaP,A),{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))*dA...
    +abs(double(subs(diff(deltaP,deltaA),{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))*ddeltaA...
    +abs(double(subs(diff(deltaP,B),{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))*dB...
    +abs(double(subs(diff(deltaP,deltaB),{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))*ddeltaB;
    Res(i,16)=abs(Res(i,15)/Res(i,14)); %erro relativo

```

```

%calculo Ed
Ed=34.7*deltaP;
Res(i,17)=double(subs(Ed,{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB})); %Ed
Res(i,18)=abs(double(subs(diff(Ed,A},{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))) *dA...
+abs(double(subs(diff(Ed,deltaA},{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))) *ddeltaA...
+abs(double(subs(diff(Ed,B},{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))) *dB...
+abs(double(subs(diff(Ed,deltaB},{A,deltaA,B,deltaB},{Res(i,2),vdeltaA,Res(i,3),vdeltaB}))) *ddeltaB;
Res(i,19)=abs(Res(i,18)/Res(i,17)); %erro relativo

%calculo de u0ini
if (Res(1,1)-0.2)<vNF
    u0ini=0;
    du0ini=0;
else
    u0ini=(z1-0.2-NF)*gamaw;
    u0ini=double(subs(u0ini,{z1,NF,gamaw},{Res(1,1),vNF,vgamaw}));
    du0ini=abs(double(subs(diff(u0ini,z1},{z1,NF,gamaw},{Res(1,1),vNF,vgamaw}))) *dz1...
+abs(double(subs(diff(u0ini,NF},{z1,NF,gamaw},{Res(1,1),vNF,vgamaw}))) *dNF...
+abs(double(subs(diff(u0ini,gamaw},{z1,NF,gamaw},{Res(1,1),vNF,vgamaw}))) *dgamaw;
end

%calculo u0
if Res(i,1)<vNF+0.2/1000
    u0=0;
    Res(i,20)=0; %u0
    Res(i,21)=0;
elseif Res(i,1)==vNF
    u0=0;
    Res(i,20)=0; %u0
    Res(i,21)=0;
else
    u0=gamaw*(zi-NF);
    Res(i,20)=double(subs(u0,{zi,NF,gamaw},{Res(i,1),vNF,vgamaw}));
    ; %u0
    Res(i,21)=abs(double(subs(diff(u0,zi},{zi,NF,gamaw},{Res(i,1),vNF,vgamaw}))) *dzi...
+abs(double(subs(diff(u0,NF},{zi,NF,gamaw},{Res(i,1),vNF,vgamaw}))) *dNF...
+abs(double(subs(diff(u0,gamaw},{zi,NF,gamaw},{Res(i,1),vNF,vgamaw}))) *dgamaw;
    Res(i,22)=abs(Res(i,21)/Res(i,20));
end

```

```

%calcula Ud
if Res(i,4)==0
    Res(i,23)=0
else
    %Ud=(P2-u0)/(P0-u0);
    Res(i,23)=(Res(i,11)-Res(i,20))/(Res(i,5)-Res(i,20));
    syms x y z
    Ud=(x-y)/(z-y);
    Res(i,24)=abs(double(subs(diff(Ud,x),{x,y,z},{Res(i,11),Res(i,20),Res(i,5)}))) * Res(i,12) ...
    +abs(double(subs(diff(Ud,y),{x,y,z},{Res(i,11),Res(i,20),Res(i,5)}))) * Res(i,21) ...
    +abs(double(subs(diff(Ud,z),{x,y,z},{Res(i,11),Res(i,20),Res(i,5)}))) * Res(i,6);

    if Res(i,23)~=0
        Res(i,25)=abs(Res(i,24)/Res(i,23));
    end
end

%calcula Id
%Id=(P1-P0)/(P0-u0);
Res(i,26)=(Res(i,8)-Res(i,5))/(Res(i,5)-Res(i,20)); %Id
syms x y z
Id=(x-y)/(y-z);
Res(i,27)=abs(double(subs(diff(Id,x),{x,y,z},{Res(i,8),Res(i,5),Res(i,20)}))) * Res(i,9) ...
+abs(double(subs(diff(Id,y),{x,y,z},{Res(i,8),Res(i,5),Res(i,20)}))) * Res(i,6) ...
+abs(double(subs(diff(Id,z),{x,y,z},{Res(i,8),Res(i,5),Res(i,20)}))) * Res(i,21);
Res(i,28)=abs(Res(i,27)/Res(i,26));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%verificação de Influencia de ID%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Nova tabela com Id, Id+erro, Id-erro
Tab(i,1)=Res(i,1);
Tab(i,2)=Res(i,26);
Tab(i,3)=Res(i,26)+Res(i,27);
Tab(i,4)=Res(i,26)-Res(i,27);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%diagrama para gamas - baridades
Res(i,29)=fgama(Res(i,26),Res(i,17)); %gama1
clear aux
aux=[fgama(Res(i,26)-Res(i,27),Res(i,17)-Res(i,18))];
aux=[aux,fgama(Res(i,26)-Res(i,27),Res(i,17)+Res(i,18))];
aux=[aux,fgama(Res(i,26)+Res(i,27),Res(i,17)-Res(i,18))];
aux=[aux,fgama(Res(i,26)+Res(i,27),Res(i,17)+Res(i,18))];
Maux=max(aux);
maux=min(aux);
Res(i,30)=abs(Maux-maux);

```



```

if Res(i,30)>1e-7
    %warndlg(sprintf('Atenção: Os erros em Id e Ed afectam a
determinação do gama (gamamin=%1.2f e gamaMax=%1.2f) a profundidade
%2.1f',maux,Maux,Res(i,1)))
end
Res(i,31)=abs(Res(i,30)/Res(i,29));

%calcula sigmatotaltop
sigmatotaltop=gamatop*((z1-0.2)/10);
vsigmatotaltop=double(subs(sigmatotaltop,{gamatop,z1},{vgamatop,Re
s(1,1)}));
dsigmatotaltop=abs(double(subs(diff(sigmatop,gamatop),{gamatop,z1,
u0ini},{vgamatop,Res(1,1),u0ini}))*dgamatop...
+abs(double(subs(diff(sigmatop,z1),{gamatop,z1},{vgamatop,Res(1,1)
}))*dz1);

%calcula sigmatop
%sigmatop=gamatop*((z1-0.2)/10)-((z1-0.2-NF)*0.098)
sigmatop=gamatop*((z1-0.2)/10)-u0ini;
vsigmatop=double(subs(sigmatop,{gamatop,z1,u0ini},{vgamatop,Res(1,1
),u0ini}));
dsigmatop=abs(double(subs(diff(sigmatop,gamatop),{gamatop,z1,u0ini}
,{vgamatop,Res(1,1),u0ini}))*dgamatop...
+abs(double(subs(diff(sigmatop,z1),{gamatop,z1,u0ini},{vgamatop,Res
(1,1),u0ini}))*dz1...
+abs(double(subs(diff(sigmatop,u0ini),{gamatop,z1,u0ini},{vgamatop,
Res(1,1),u0ini}))*du0ini);

%calcula sigmatotal
if i==1
    if Res(1,1)==0.2
        sigmatotal=((gamal*0.2)/10);
        Res(1,71)=double(subs(sigmatotal,{gamal},{Res(1,29)}));
        syms x
        sigmatotal1=((x*0.2)/10);
        Res(1,72)=abs(double(subs(diff(sigmatotal1,x),{x},{Res(1,29
)})))*Res(1,30);
    else
        Res(1,71)=vsigmatotaltop+((Res(i,29)*0.2)/10);
        syms x y
        sigmatotal1=x+((y*0.2)/10);
        Res(1,72)=abs(double(subs(diff(sigmatotal1,x),{x,y},{vsigma
totaltop,Res(1,29)}))*dsigmatotaltop...
+abs(double(subs(diff(sigmatotal1,y),{x,y},{vsigmatotaltop,
Res(1,29)}))*Res(1,30);
    end
else
    Res(i,71)=Res(i-1,71)+(Res(i,29)*0.2/10);
    syms x y
    sigmatotal1=x+(y*0.2/10);
    Res(i,72)=abs(double(subs(diff(sigmatotal1,x),{x,y},{Res(i-
1,71),Res(i,29)}))*Res(i-1,72)...

```

```

+abs(double(subs(diff(sigmatotall,y),{x,y},{Res(i-
1,71),Res(i,29)}))) *Res(i,30);
end
Res(i,73)=abs(Res(i,72)/Res(i,71));

%calculo sigmav0
sigmav0=sigmatotal-u0;
Res(i,32)=Res(i,71)-Res(i,20);
syms x y
sigmav01=x-y;;
Res(i,33)=abs(double(subs(diff(sigmav01,x),{x,y},{Res(i,71),Res(i,2
0)}))) *Res(i,72)...
+abs(double(subs(diff(sigmav01,y),{x,y},{Res(i,71),Res(i,20)}))) *Re
s(i,21);
Res(i,34)=abs(Res(i,33)/Res(i,32));

%Calculo de Kd
%kd=(P0-u0)/sigmav0;
Res(i,35)=(Res(i,5)-Res(i,20))/Res(i,32);
syms x y z
kd=(x-y)/z;
Res(i,36)=abs(double(subs(diff(kd,x),{x,y,z},{Res(i,5),Res(i,20),Re
s(i,32)}))) *Res(i,6)...
+abs(double(subs(diff(kd,y),{x,y,z},{Res(i,5),Res(i,20),Res(i,32)}))
)*Res(i,21)...
+abs(double(subs(diff(kd,z),{x,y,z},{Res(i,5),Res(i,20),Res(i,32)}))
)*Res(i,33);
Res(i,37)=abs(Res(i,36)/Res(i,35));

%Tipo de solo
if Res(i,26)>3.3
    Res(i,38)=0;%('solos arenonos')
    if (Res(i,26)-Res(i,27))<3.3
        Res(i,39)=1;
    end
elseif Res(i,26)<3.3 & Res(i,26)>1.8
    Res(i,38)=1;%('solos areno-siltosos')
    if (Res(i,26)+Res(i,27))>3.3
        Res(i,39)=0;
    elseif (Res(i,26)-Res(i,27))<1.8
        Res(i,39)=2;
    end
elseif Res(i,26)<1.8 & Res(i,26)>1.2
    Res(i,38)=2;%('solos silto-arenosos')
    if (Res(i,26)+Res(i,27))>1.8
        Res(i,39)=1;
    elseif (Res(i,26)-Res(i,27))<1.2
        Res(i,39)=3;
    end
elseif Res(i,26)<1.2 & Res(i,26)>0.9

```

```

Res(i,38)=3;%('solos siltosos')
if (Res(i,26)+Res(i,27))>1.2
    Res(i,39)=2;
elseif (Res(i,26)-Res(i,27))<0.9
    Res(i,39)=4;
end
elseif Res(i,26)<0.9 & Res(i,26)>0.6
    Res(i,38)=4;%('solos silto-argilosos')
    if (Res(i,26)+Res(i,27))>0.9
        Res(i,39)=3;
    elseif (Res(i,26)-Res(i,27))<0.6
        Res(i,39)=5;
    end
elseif Res(i,26)<0.6 & Res(i,26)>0.35
    Res(i,38)=5;%('solos argilo-siltosos')
    if (Res(i,26)+Res(i,27))>0.6
        Res(i,39)=4;
    elseif (Res(i,26)-Res(i,27))<0.35
        Res(i,39)=6;
    end
elseif Res(i,26)<0.35 & Res(i,26)>0.1
    Res(i,38)=6;%('solos argilosos')
    if (Res(i,26)+Res(i,27))>0.35
        Res(i,39)=5;
    elseif (Res(i,26)-Res(i,27))<0.1
        Res(i,39)=7;
    end
end
else
    Res(i,38)=7;%('argilas sensiveis')
    if (Res(i,26)+Res(i,27))>0.1
        Res(i,39)=6;
    end
end
if Res(i,39)==0
    Res(i,40)=0;
else
    Res(i,40)=Res(i,38)-Res(i,39);
end

%calculo de M
if Res(i,26)<=0.6
    if (0.14+2.36*(log10(Res(i,35))))<0.85
        Res(i,41)=0.85*Res(i,17
        Res(i,42)=abs(0.85)*Res(i,18);
        syms x
        M=0.85*x
        DpM(i,3)=abs(double(subs(diff(M,x),{Res(i,17)})));
        DpM(i,4)=Res(i,18);
    end
end

```

```

else
    %M=(0.14+2.36*(log10(kd)))*Ed
    Res(i,41)=(0.14+2.36*(log10(Res(i,35))))*Res(i,17);
    syms x y
    M=(0.14+2.36*log10(y))*x;
    Res(i,42)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)}))) *Res(i,18)...
    +abs(double(subs(diff(M,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)}))) *R
    es(i,36);
    DpM(i,1)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)}))) ;
    DpM(i,2)=Res(i,18);
    DpM(i,3)=abs(double(subs(diff(M,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)}))) ;
    DpM(i,4)=Res(i,36);
end

elseif Res(i,26)>=3
    if (0.5+2*(log10(Res(i,35))))<0.85
        Res(i,41)=0.85*Res(i,17);
        Res(i,42)=abs(0.85)*Res(i,18);
        syms x
        M=0.85*x
        DpM2(i)=abs(double(subs(diff(M,x),{Res(i,17)}))) ;
        EM2(i)=Res(i,18);
    else
        %M=(0.5+2*log10(kd))*Ed
        Res(i,41)=(0.5+2*log10(Res(i,35)))*Res(i,17);
        syms x y
        M=(0.5+2*log10(y))*x;
        Res(i,42)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)}))) *Res(i,18)...
        +abs(double(subs(diff(M,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)}))) *R
        es(i,36);
        DpM(i,1)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)}))) ;
        DpM(i,2)=Res(i,18);
        DpM(i,3)=abs(double(subs(diff(M,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)}))) ;
        DpM(i,4)=Res(i,36);
    end

else
    if (0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4)+(2.5-
    (0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4)))*(log10(Res(i,35))))<0.85
        %M=0.85*Ed
        Res(i,41)=0.85*Res(i,17);
        Res(i,42)=abs(0.85)*Res(i,18);
        syms x
        M=0.85*x
        DpM(i,3)=abs(double(subs(diff(M,x),{Res(i,17)}))) ;

```

```

DpM(i,4)=Res(i,18);
else
    Res(i,41)=(0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4))+(2.5-
    (0.14+0.36*((Res(i,26)-
    0.6)/2.4)))*log10(Res(i,35))*Res(i,17);
    syms x y z
    M=((0.14+0.36*((z-0.6)/2.4)+2.5-(0.14+0.36*((z-
    0.6)/2.4)))*log10(y))*x;
    Res(i,42)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y,z},{Res(i,26),Res(i,
    35),Res(i,17)})))*Res(i,27)...
    +abs(double(subs(diff(M,y),{x,y,z},{Res(i,26),Res(i,35),Res
    (i,17)})))*Res(i,36)...
    +abs(double(subs(diff(M,z),{x,y,z},{Res(i,26),Res(i,35),Res
    (i,17)})))*Res(i,18);
    DpM(i,1)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y,z},{Res(i,17),Res(i,
    35),Res(i,2)}))));
    DpM(i,2)=Res(i,18);
    DpM(i,3)=abs(double(subs(diff(M,y),{x,y,z},{Res(i,17),Res(i,
    35),Res(i,26)}))));
    DpM(i,4)=Res(i,36);
    DpM(i,5)=abs(double(subs(diff(M,z),{x,y,z},{Res(i,17),Res(i,
    35),Res(i,26)}))));
    DpM(i,6)=Res(i,27);
end
end
Res(i,43)=abs(Res(i,42)/Res(i,41));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Erro de Id -Influencia M%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tab(i,5)=Res(i,41);
Tab(i,6)=Res(i,42);
Tab(i,7)=Res(i,43);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Tab(i,3)<=0.6
    if (0.14+2.36*(log10(Res(i,35))))<0.85
        Tab(i,8)=0.85*Res(i,17);    %M=0.85*Ed
        Tab(i,9)=abs(0.85)*Res(i,18);
    else
        %M=(0.14+2.36*(log10(kd)))*Ed
        Tab(i,8)=(0.14+2.36*(log10(Res(i,35))))*Res(i,17);
        syms x y
        M=(0.14+2.36*log10(y))*x;
        Tab(i,9)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,3
        5)})))*Res(i,18)...
        +abs(double(subs(diff(M,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)})))*R
        es(i,36);
    end

elseif Tab(i,3)>=3
    if (0.5+2*(log10(Res(i,35))))<0.85
        Tab(i,8)=0.85*Res(i,17);    %M=0.85*Ed
        Tab(i,9)=abs(0.85)*Res(i,18);
    else

```

```

%M=(0.5+2*log10(kd))*Ed
Tab(i,8)=(0.5+2*log10(Res(i,35)))*Res(i,17);
syms x y
M=(0.5+2*log10(y))*x;
Tab(i,9)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)})))
*Res(i,18)...
+abs(double(subs(diff(M,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)})))
*Res(i,36);
end

else
if (0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4)+(2.5-
(0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4))*(log10(Res(i,35))))<0.85
%M=0.85*Ed
Tab(i,8)=0.85*Res(i,17);
Tab(i,9)=abs(0.85)*Res(i,18);
else
Tab(i,8)=((0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4)+(2.5-
(0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4))*log10(Res(i,35))))*Res(i,17);
syms x y z
M=((0.14+0.36*((z-0.6)/2.4)+2.5-(0.14+0.36*((z-0.6)/2.4))*log10(y))*x;
Tab(i,9)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y,z},{Res(i,26),Res(i,35),Res(i,17)})))
*Res(i,27)...
+abs(double(subs(diff(M,y),{x,y,z},{Res(i,26),Res(i,35),Res(i,17)})))
*Res(i,36)...
+abs(double(subs(diff(M,z),{x,y,z},{Res(i,26),Res(i,35),Res(i,17)})))
*Res(i,18);
end
end
Tab(i,10)=abs(Tab(i,9)/Tab(i,8));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Id-ERRO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Tab(i,4)<=0.6
if (0.14+2.36*(log10(Res(i,35))))<0.85
Tab(i,11)=0.85*Res(i,17); %M=0.85*Ed =
Tab(i,12)=abs(0.85)*Res(i,18);
else
%M=(0.14+2.36*(log10(kd)))*Ed
Tab(i,11)=(0.14+2.36*(log10(Res(i,35)))*Res(i,17);
syms x y
M=(0.14+2.36*log10(y))*x;
Tab(i,12)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)})))
*Res(i,18)...
+abs(double(subs(diff(M,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)})))
*Res(i,36);
end

elseif Tab(i,4)>=3
if (0.5+2*(log10(Res(i,35))))<0.85
Tab(i,11)=0.85*Res(i,17); %M=0.85*Ed --

```

```

        Tab(i,12)=abs(0.85)*Res(i,18);
    else
        %M=(0.5+2*log10(kd))*Ed
        Tab(i,11)=(0.5+2*log10(Res(i,35)))*Res(i,17);
        syms x y
        M=(0.5+2*log10(y))*x;
        Tab(i,12)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)})))*Res(i,18)...
        +abs(double(subs(diff(M,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,35)})))*R
        es(i,36);
    end

else
    if (0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4)+(2.5-
    (0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4)))*(log10(Res(i,35))))<0.85
        %M=0.85*Ed
        Tab(i,11)=0.85*Res(i,17);
        Tab(i,12)=abs(0.85)*Res(i,18);
    else
        Tab(i,11)=((0.14+0.36*((Res(i,26)-0.6)/2.4)))+(2.5-
        (0.14+0.36*((Res(i,26)-
        0.6)/2.4)))*log10(Res(i,35))*Res(i,17);
        syms x y z
        M=((0.14+0.36*((z-0.6)/2.4)+2.5-(0.14+0.36*((z-
        0.6)/2.4)))*log10(y))*x;
        Tab(i,12)=abs(double(subs(diff(M,x),{x,y,z},{Res(i,26),Res(
        i,35),Res(i,17)})))*Res(i,27)...
        +abs(double(subs(diff(M,y),{x,y,z},{Res(i,26),Res(i,35),Res
        (i,17)})))*Res(i,36)...
        +abs(double(subs(diff(M,z),{x,y,z},{Res(i,26),Res(i,35),Res
        (i,17)})))*Res(i,18);
    end
end
end
Tab(i,13)=abs(Tab(i,12)/Tab(i,11));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%calculo k0
if Res(i,26)<=1.2
    if (((Res(i,35)/1.5)^0.47)-0.6)<0.3
        Res(i,44)=0.3;
        Res(i,45)=0;
    else
        %k0=((kd/1.5)^0.47)-0.6
        Res(i,44)=((Res(i,35)/1.5)^0.47)-0.6;
        syms x
        k0=((x/1.5)^0.47)-0.6;
        Res(i,45)=abs(double(subs(diff(k0,x),{x},{Res(i,35)})))*Res
        (i,36);
    end
end
else
    %k0=0.376+(0.0389*kd)

```

```

Res(i,44)=0.376+(0.0389*Res(i,35));
syms x
k0=0.376+(0.0389*x);
Res(i,45)=abs(double(subs(diff(k0,x),{x},{Res(i,35)}))) *Res(i,
36);
end
Res(i,46)=abs(Res(i,45)/Res(i,44));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Erro de ID - Influencia k0%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tab(i,14)=Tab(i,2);
Tab(i,15)=Tab(i,3);
Tab(i,16)=Tab(i,4);
Tab(i,17)=Res(i,44);
Tab(i,18)=Res(i,45);
Tab(i,19)=Res(i,46);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Id+Erro%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Tab(i,3)<=1.2
    if ((Res(i,35)/1.5)^0.47)-0.6<0.3
        Tab(i,20)=0.3;
        Tab(i,21)=0;
    else
        %k0=((kd/1.5)^0.47)-0.6
        Tab(i,20)=((Res(i,35)/1.5)^0.47)-0.6;
        syms x
        k0=((x/1.5)^0.47)-0.6;
        Tab(i,21)=abs(double(subs(diff(k0,x),{x},{Res(i,35)}))) *Res
(i,36);
    end
else
    %k0=0.376+(0.0389*kd)
    Tab(i,20)=0.376+(0.0389*Res(i,35));
    syms x
    k0=0.376+(0.0389*x);
    Tab(i,21)=abs(double(subs(diff(k0,x),{x},{Res(i,35)}))) *Res(i,
36);
end

if Tab(i,20)==0
    Tab(i,22)=0;
else
    Tab(i,22)=abs(Tab(i,21)/Tab(i,20));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Id-Erro%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Tab(i,4)<=1.2
    if ((Res(i,35)/1.5)^0.47)-0.6<0.3
        Tab(i,23)=0.3;
        Tab(i,24)=0;
    else
        %k0=((kd/1.5)^0.47)-0.6

```



```

        Tab(i,23)=(Res(i,35)/1.5)^0.47)-0.6;
        syms x
        k0=((x/1.5)^0.47)-0.6;
        Tab(i,24)=abs(double(subs(diff(k0,x),{x},{Res(i,35)})))*Res
        (i,36);
    end
else
    %k0=0.376+(0.0389*kd)
    Tab(i,23)=0.376+(0.0389*Res(i,35));
    syms x
    k0=0.376+(0.0389*x);
    Tab(i,24)=abs(double(subs(diff(k0,x),{x},{Res(i,35)})))*Res(i,
    36);
end
Tab(i,25)=abs(Tab(i,24)/Tab(i,23));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%calculo OCR
if Res(i,26)<=1.2
    %OCR=(0.5*kd)^1.56;
    Res(i,47)=(0.5*Res(i,35))^1.56;
    Res(i,48)=abs((1.56*(0.5*Res(i,35))^0.56)*0.5)*Res(i,36);
elseif Res(i,26)>2
    %OCR=(0.67*kd)^1.91;
    Res(i,47)=(0.67*Res(i,35))^1.91;
    syms x
    OCR1=(0.67*x)^1.91;
    Res(i,48)=abs(double(subs(diff(OCR1,x),{Res(i,35)})))*Res(i,36
    );
else
    %OCR=(m*kd)^n
    Res(i,47)=((0.5+0.17*((Res(i,26)-
    1.2)/0.8))*Res(i,35))^(1.56+0.35*((Res(i,26)-1.2)/0.8));
    syms x y
    OCR1=((0.5+0.17*((x-1.2)/0.8))*y)^(1.56+0.35*((x-1.2)/0.8));
    Res(i,48)=abs(double(subs(diff(OCR1,x),{x,y},{Res(i,26),Res(i,
    35)})))*Res(i,27)...
    +abs(double(subs(diff(OCR1,y),{x,y},{Res(i,26),Res(i,35)})))*R
    es(i,36);
end
Res(i,49)=abs(Res(i,48)/Res(i,47));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Erro de ID - Influencia OCR%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tab(i,26)=Tab(i,2);
Tab(i,27)=Tab(i,3);
Tab(i,28)=Tab(i,4);
Tab(i,29)=Res(i,47);
Tab(i,30)=Res(i,48);
Tab(i,31)=Res(i,49);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Id+Erro%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Tab(i,3)<=1.2

```

```

%OCR=(0.5*kd)^1.56;
Tab(i,32)=(0.5*Res(i,35))^1.56;
Tab(i,33)=abs((1.56*(0.5*Res(i,35))^0.56)*0.5)*Res(i,36);
elseif Tab(i,3)>2
%OCR=(0.67*kd)^1.91;
Tab(i,32)=(0.67*Res(i,35))^1.91;
syms x
OCR1=(0.67*x)^1.91;
Tab(i,33)=abs(double(subs(diff(OCR1,x),{Res(i,35)})))*Res(i,36);
else
%OCR=(m*kd)^n
Tab(i,32)=((0.5+0.17*((Res(i,26)-1.2)/0.8))*Res(i,35))^(1.56+0.35*((Res(i,26)-1.2)/0.8));
syms x y
OCR1=((0.5+0.17*((x-1.2)/0.8))*y)^(1.56+0.35*((x-1.2)/0.8));
Tab(i,33)=abs(double(subs(diff(OCR1,x),{x,y},{Res(i,26),Res(i,35)})))*Res(i,27)...
+abs(double(subs(diff(OCR1,y),{x,y},{Res(i,26),Res(i,35)})))*Res(i,36);
end
Tab(i,34)=abs(Tab(i,33)/Tab(i,32));

%%%%%%%%%Id-Error%%%%%%%%%
if Tab(i,4)<=1.2
%OCR=(0.5*kd)^1.56;
Tab(i,35)=(0.5*Res(i,35))^1.56;
Tab(i,36)=abs((1.56*(0.5*Res(i,35))^0.56)*0.5)*Res(i,36);
elseif Tab(i,3)>2
%OCR=(0.67*kd)^1.91;
Tab(i,35)=(0.67*Res(i,35))^1.91;
syms x
OCR1=(0.67*x)^1.91;
Tab(i,36)=abs(double(subs(diff(OCR1,x),{Res(i,35)})))*Res(i,36);
else
%OCR=(m*kd)^n
Tab(i,35)=((0.5+0.17*((Res(i,26)-1.2)/0.8))*Res(i,35))^(1.56+0.35*((Res(i,26)-1.2)/0.8));
syms x y
OCR1=((0.5+0.17*((x-1.2)/0.8))*y)^(1.56+0.35*((x-1.2)/0.8));
Tab(i,36)=abs(double(subs(diff(OCR1,x),{x,y},{Res(i,26),Res(i,35)})))*Res(i,27)...
+abs(double(subs(diff(OCR1,y),{x,y},{Res(i,26),Res(i,35)})))*Res(i,36);
end
Tab(i,37)=abs(Tab(i,36)/Tab(i,35));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%calculo de cu e phi
if Res(i,26)<=0.9
%cu=22*(sigmav0*(0.5*kd)^1.25)/100

```

```

Res(i,50)=22*(Res(i,32)*(0.5*Res(i,35))^1.25)/100;
syms x y
cu=22*(x*(0.5*y)^1.25)/100;
Res(i,51)=abs(double(subs(diff(cu,x),{x,y},{Res(i,32),Res(i,35)})))
*Res(i,33)...
+abs(double(subs(diff(cu,y),{x,y},{Res(i,32),Res(i,35)})))
*Res(i,36);
Res(i,52)=abs(Res(i,51)/Res(i,50));
else
%phi=28+14.6*log10(kd)-2.1*(log10(kd))^2;
Res(i,53)=28+14.6*(log10(Res(i,35)))-2.1*(log10(Res(i,35)))^2;
syms x
phi=28+14.6*log10(x)-2.1*(log10(x))^2;
Res(i,54)=abs(double(subs(diff(phi,x),{x},{Res(i,35)})))
*Res(i,36);
Res(i,55)=abs(Res(i,54)/Res(i,53));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Erro de ID - Influencia cu e phi%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tab(i,38)=Tab(i,2);
Tab(i,39)=Tab(i,3);
Tab(i,40)=Tab(i,4);
Tab(i,41)=Res(i,50);
Tab(i,42)=Res(i,51);
Tab(i,43)=Res(i,52);
Tab(i,50)=Res(i,53);
Tab(i,51)=Res(i,54);
Tab(i,52)=Res(i,55);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Id+Erro%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Tab(i,3)<=0.9
%cu=22*(sigmav0*(0.5*kd)^1.25)/100
Tab(i,44)=22*(Res(i,32)*(0.5*Res(i,35))^1.25)/100;
syms x y
cu=22*(x*(0.5*y)^1.25)/100;
Tab(i,45)=abs(double(subs(diff(cu,x),{x,y},{Res(i,32),Res(i,35)})))
*Res(i,33)...
+abs(double(subs(diff(cu,y),{x,y},{Res(i,32),Res(i,35)})))
*Res(i,36);
Tab(i,46)=abs(Tab(i,45)/Tab(i,44));
else
%phi=28+14.6*log10(kd)-2.1*(log10(kd))^2;
Tab(i,53)=28+14.6*(log10(Res(i,35)))-2.1*(log10(Res(i,35)))^2;
syms x
phi=28+14.6*log10(x)-2.1*(log10(x))^2;
Tab(i,54)=abs(double(subs(diff(phi,x),{x},{Res(i,35)})))
*Res(i,36);
Tab(i,55)=abs(Tab(i,54)/Tab(i,53));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Id+Erro%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Tab(i,4)<=0.9

```

```

%cu=22*(sigmav0*(0.5*kd)^1.25)/100
Tab(i,47)=22*(Res(i,32)*(0.5*Res(i,35))^1.25)/100;
syms x y
cu=22*(x*(0.5*y)^1.25)/100;
Tab(i,48)=abs(double(subs(diff(cu,x),{x,y},{Res(i,32),Res(i,35)})))
*Res(i,33)...
+abs(double(subs(diff(cu,y),{x,y},{Res(i,32),Res(i,35)})))
*Res(i,36);
Tab(i,49)=abs(Tab(i,48)/Tab(i,47));
else
%phi=28+14.6*log10(kd)-2.1*(log10(kd))^2;
Tab(i,56)=28+14.6*(log10(Res(i,35)))-2.1*(log10(Res(i,35)))^2;
syms x
phi=28+14.6*log10(x)-2.1*(log10(x))^2;
Tab(i,57)=abs(double(subs(diff(phi,x),{x},{Res(i,35)})))
*Res(i,36);
Tab(i,58)=abs(Tab(i,57)/Tab(i,56));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%c' (kPa)
ac=0.3766;
bc=3.0887;
dac=5e-5;
dbc=dac;
%c=0.3766*OCR+3.0887;
c=ac*OCR+bc;
Res(i,56)=ac*Res(i,47)+bc;
syms x y z
%c1=0.3766*x+3.0887;
c1=y*x+z;
Res(i,57)=abs(double(subs(diff(c1,x),{x,y,z},{Res(i,47),ac,bc})))
*Res(i,48)...
+abs(double(subs(diff(c1,y),{x,y,z},{Res(i,47),ac,bc})))
*dac...
+abs(double(subs(diff(c1,z),{x,y,z},{Res(i,47),dac,bc})))
*dbc;
Res(i,58)=abs(Res(i,57)/Res(i,56));

%phi(c'/sigmav0)
phisigmav0=phi-(0.1573*(c/sigmav0)+0.0698);
Res(i,59)=Res(i,53)-(0.1573*(Res(i,56)/Res(i,32))+0.0698);
syms x y z
phisigmav01=x-(0.1573*(y/z)+0.0698);
Res(i,60)=abs(double(subs(diff(phisigmav01,x),{x,y,z},{Res(i,53),Res(i,56),Res(i,32)})))
*Res(i,54)...
+abs(double(subs(diff(phisigmav01,y),{x,y,z},{Res(i,53),Res(i,56),Res(i,32)})))
*Res(i,57)...
+abs(double(subs(diff(phisigmav01,z),{x,y,z},{Res(i,53),Res(i,56),Res(i,32)})))
*Res(i,33);
Res(i,61)=abs(Res(i,60)/Res(i,59));

%phi(c')

```

```

phic=phi-0.377*c;
Res(i,62)=Res(i,53)-0.377*Res(i,56);
syms x y
phic1=x-0.377*y;
Res(i,63)=abs(double(subs(diff(phic1,x),{x,y},{Res(i,53),Res(i,56)})))
)*Res(i,54)...
+abs(double(subs(diff(phic1,y),{x,y},{Res(i,53),Res(i,56)})))
)*Res(i,57);
Res(i,64)=abs(Res(i,63)/Res(i,62));

%calculo de G0 Cruz el al (2006)
%G0C=(Ed/10)*3.9366*Id^(-0.6117);
Res(i,65)=(Res(i,17)/10)*3.9366*Res(i,26)^(-0.6117);
syms x y
G0C=(x/10)*3.9366*y^(-0.6117);
Res(i,66)=abs(double(subs(diff(G0C,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,26)})))
)*Res(i,18)...
+abs(double(subs(diff(G0C,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,26)})))
)*Res(i,27);
Res(i,67)=abs(Res(i,66)/Res(i,65));
DpG0C(i,1)=abs(double(subs(diff(G0C,x),{x,y},{Res(i,17),Res(i,26)})))
));
DpG0C(i,2)=Res(i,18);
DpG0C(i,3)=abs(double(subs(diff(G0C,y),{x,y},{Res(i,17),Res(i,26)})))
);
DpG0C(i,4)=Res(i,27);

%calculo de G0 Hryciw
%G0H=((530/(sigmav0/1)^0.25)*(((gamal/1)-1)/(2.7-
gamal/1)))*(k0^0.25)*(sigmav0/1)^0.5)/10;
Res(i,68)=530/(Res(i,32))^0.25*((Res(i,29)-1)/(2.7-
Res(i,29)))*(Res(i,44)^0.25)*(Res(i,32)^0.5)*0.1;
syms x y z
G0H=((530/(x/1)^0.25)*(((y/1)-1)/(2.7-
y/1)))*(z^0.25)*(x/1)^0.5)/10;
Res(i,69)=abs(double(subs(diff(G0H,x),{x,y,z},{Res(i,32),Res(i,29),
Res(i,44)})))
)*Res(i,33)...
+abs(double(subs(diff(G0H,y),{x,y,z},{Res(i,32),Res(i,29),Res(i,44)})))
)*Res(i,30)...
+abs(double(subs(diff(G0H,z),{x,y,z},{Res(i,32),Res(i,29),Res(i,44)})))
)*Res(i,45);
DpG0H(i,1)=abs(double(subs(diff(G0H,x),{x,y,z},{Res(i,32),Res(i,29),
Res(i,44)})))
);
DpG0H(i,2)=Res(i,33);
DpG0H(i,3)=abs(double(subs(diff(G0H,y),{x,y,z},{Res(i,32),Res(i,29),
Res(i,44)})))
);
DpG0H(i,4)=Res(i,30);
DpG0H(i,5)=abs(double(subs(diff(G0H,z),{x,y,z},{Res(i,32),Res(i,29),
Res(i,44)})))
);
DpG0H(i,6)=Res(i,45);
Res(i,70)=abs(Res(i,69)/Res(i,68));

```

```

end
DpG0C(:,5)=DpG0C(:,1).*DpG0C(:,2);
DpG0C(:,6)=DpG0C(:,3).*DpG0C(:,4);
DpG0H(:,7)=DpG0H(:,1).*DpG0H(:,2);
DpG0H(:,8)=DpG0H(:,3).*DpG0H(:,4);
DpG0H(:,9)=DpG0H(:,5).*DpG0H(:,6);
DpM(:,7)=DpM(:,1).*DpM(:,2);
DpM(:,8)=DpM(:,3).*DpM(:,4);
DpM(:,9)=DpM(:,5).*DpM(:,6);
clc

xlswrite('Resultadostemp',Res)
xlswrite('Tab_Id',Tab)

xlswrite('Erros_G0C',DpG0C)
xlswrite('Erros_G0H',double(DpG0H))
xlswrite('Erros_M',double(DpM))

semilogx('v6',Res(:,26),Res(:,1))
set(gca,'YDir','reverse')
hold on
xlim([0.1,10]);
ylim([Res(1,1),Res(nl,1)]);
set(gca,'YDir','reverse')
hold on
rectangle('Position',[0,Res(1,1),0.1,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 1 0.8]);
rectangle('Position',[0.1,Res(1,1),0.35,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 1 0.4]);
rectangle('Position',[0.35,Res(1,1),0.6,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 1 0]);
rectangle('Position',[0.6,Res(1,1),0.9,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 0.7 0]);
rectangle('Position',[0.9,Res(1,1),1.2,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 0.5 0]);
rectangle('Position',[1.2,Res(1,1),1.8,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 0 0]);
rectangle('Position',[1.8,Res(1,1),3.3,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[0.8 0 0]);
rectangle('Position',[3.3,Res(1,1),10,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[0.6 0 0]);
hold on
semilogx(Res(:,26),Res(:,1),'b',Res(:,26)+Res(:,27),Res(:,1),'g',Res(:,26)-Res(:,27),Res(:,1),'m');
ylabel('Profundidade (m)','FontSize',14);
title('\it{Id}','FontSize',16);

hold off

k=1
for i=5:3:70

```

```

k=k+1
figure(k)
if max(Res(:,i))==0
    xlim([min(0),max(10)]);
else
    xlim([min((Res(:,i)-Res(:,i+1))-
1),max((Res(:,i)+Res(:,i+1))+1)]);
end
set(gca,'YDir','reverse')
ylim([Res(1,1),Res(nl,1)]);

hold on
plot(Res(:,i),Res(:,1));
for j=1:nl
    if Res(j,38)==7
        rectangle('Position',[-
1,Res(j,1),4000,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 1 0.8]);
    elseif Res(j,38)==6
        rectangle('Position',[-
1,Res(j,1),4000,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 1 0.4]);
    elseif Res(j,38)==5
        rectangle('Position',[-
1,Res(j,1),4000,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 1 0]);
    elseif Res(j,38)==4
        rectangle('Position',[-
1,Res(j,1),4000,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 0.7 0]);
    elseif Res(j,38)==3
        rectangle('Position',[-
1,Res(j,1),4000,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 0.5 0]);
    elseif Res(j,38)==2
        rectangle('Position',[-
1,Res(j,1),4000,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[1 0 0]);
    elseif Res(j,38)==1
        rectangle('Position',[-
1,Res(j,1),4000,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[0.8 0 0]);
    else
        rectangle('Position',[-
1,Res(j,1),4000,Res(size(Res,1))],'FaceColor',[0.6 0 0]);
    end
end
hold on

plot(Res(:,i),Res(:,1),'b',Res(:,i)+Res(:,i+1),Res(:,1),'g',Res(:,i)-
Res(:,i+1),Res(:,1),'m');
ylabel('Profundidade (m)','FontSize',14);
if i==5
    title('\it{P0}','FontSize',16);
elseif i==8
    title('\it{P1}','FontSize',16);
elseif i==11
    title('\it{P2}','FontSize',16);
elseif i==14

```

```

        title('\it{\Delta P}', 'FontSize', 16);
elseif i==17
    title('\it{ED}', 'FontSize', 16);
elseif i==20
    title('\it{u0}', 'FontSize', 16);
elseif i==23
    title('\it{Ud}', 'FontSize', 16);
elseif i==26
    title('\it{Id}', 'FontSize', 16);
elseif i==29
    title('\it{\gamma}', 'FontSize', 16);
elseif i==32
    title('\it{\sigma v0}', 'FontSize', 16);
elseif i==35
    title('\it{kd}', 'FontSize', 16);
elseif i==38
    title('\it{Tipo de solo}', 'FontSize', 16);
elseif i==41
    title('\it{M}', 'FontSize', 16);
elseif i==44
    title('\it{k0}', 'FontSize', 16);
elseif i==47
    title('\it{OCR}', 'FontSize', 16);
elseif i==50
    title('\it{cu}', 'FontSize', 16);
elseif i==53
    title('\it{\phi}', 'FontSize', 16);
elseif i==56
    title('\it{c}', 'FontSize', 16);
elseif i==59
    title('\it{\phi \sigma v0}', 'FontSize', 16);
elseif i==62
    title('\it{\phi ic}', 'FontSize', 16);
elseif i==65
    title('\it{G0Cruz}', 'FontSize', 16);
elseif i==68
    title('\it{G0Hy}', 'FontSize', 16);
end
end
end

```


Função gama

```
function [vgama]=fgama(Id,Ed)
if Id<0.6
    if Ed<10
        vgama=1.5;
    elseif Ed>=10 & Ed<10^(1.737+0.585*log10(Id))
        vgama=1.6
    elseif Ed>=10^(1.737+0.585*log10(Id)) &
Ed<10^(2.013+0.621*log10(Id))
        vgama=1.7
    elseif Ed>=10^(2.013+0.621*log10(Id)) &
Ed<10^(2.289+0.657*log10(Id))
        vgama=1.8
    elseif Ed>=10^(2.289+0.657*log10(Id)) &
Ed<10^(2.564+0.694*log10(Id))
        vgama=1.9
    elseif Ed>=10^(2.564+0.694*log10(Id))
        vgama=2.05
    end

elseif Id>0.6 & Id<1.8
    if Ed<10
        vgama=1.5;
    elseif Ed>=10 & Ed<10^(1.737+0.585*log10(Id))
        vgama=1.6
    elseif Ed>=10^(1.737+0.585*log10(Id)) &
Ed<10^(2.013+0.621*log10(Id))
        vgama=1.7
    elseif Ed>=10^(2.013+0.621*log10(Id)) &
Ed<10^(2.289+0.657*log10(Id))
        vgama=1.8
    elseif Ed>=10^(2.289+0.657*log10(Id)) &
Ed<10^(2.564+0.694*log10(Id))
        vgama=1.95
    elseif Ed>=10^(2.564+0.694*log10(Id))
        vgama=2.1
    end

elseif Id>=1.8 & Id<8
    if Ed<10
        vgama=1.5;
    elseif Ed>=10 & Ed<10^(1.737+0.585*log10(Id))
        vgama=1.7
    elseif Ed>=10^(1.737+0.585*log10(Id)) &
Ed<10^(2.013+0.621*log10(Id))
        vgama=1.8
    elseif Ed>=10^(2.013+0.621*log10(Id)) &
Ed<10^(2.289+0.657*log10(Id))
        vgama=1.9
    elseif Ed>=10^(2.289+0.657*log10(Id)) &
Ed<10^(2.564+0.694*log10(Id))
        vgama=2
    elseif Ed>=10^(2.564+0.694*log10(Id))
        vgama=2.15
    end
else
    %warndlg(sprintf('Atenção: ID=%2.2f (>8)',Id))
    if Ed<10
        vgama=1.5;
    elseif Ed>=10 & Ed<10^(1.737+0.585*log10(Id))
        vgama=1.7
```

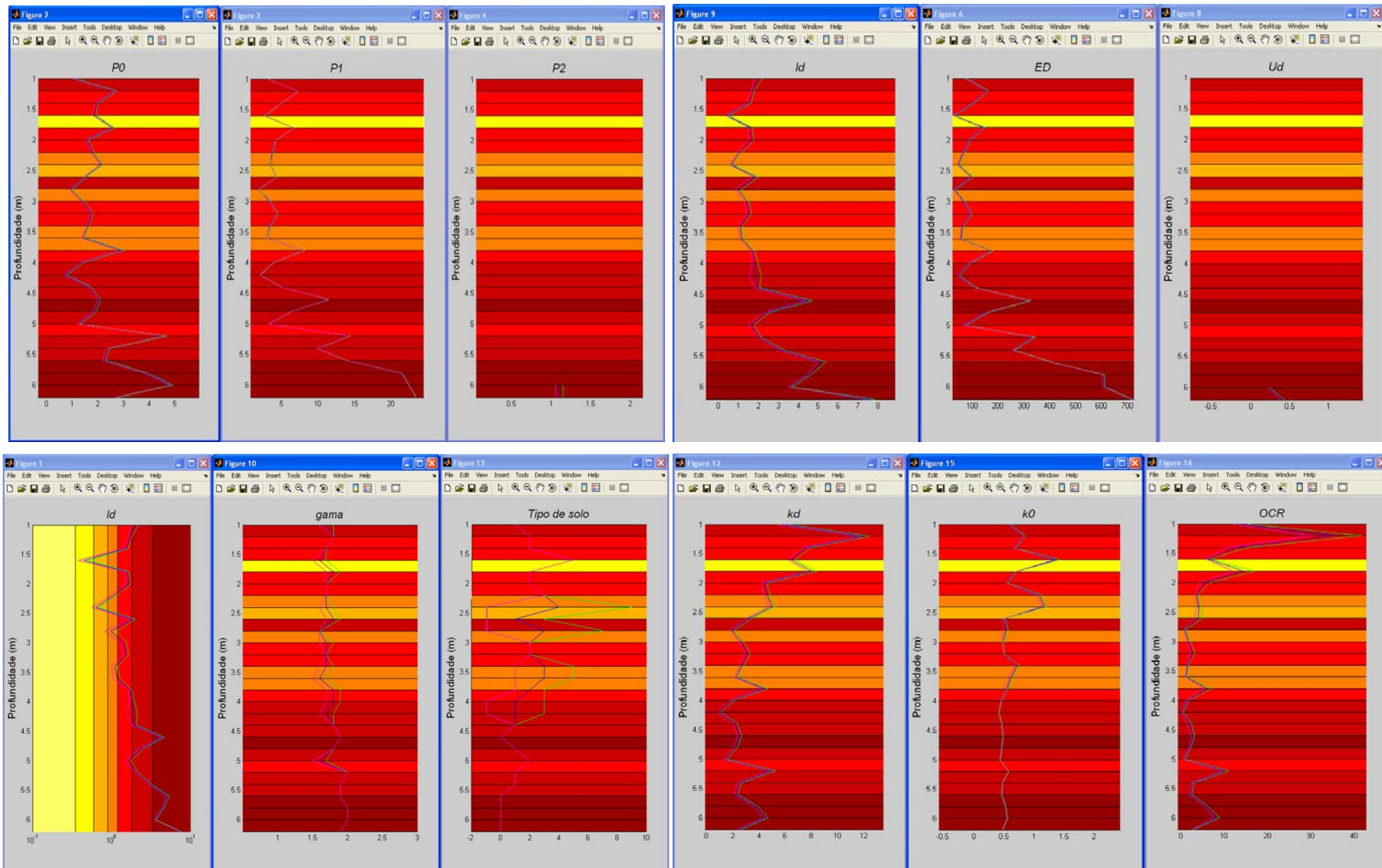
```

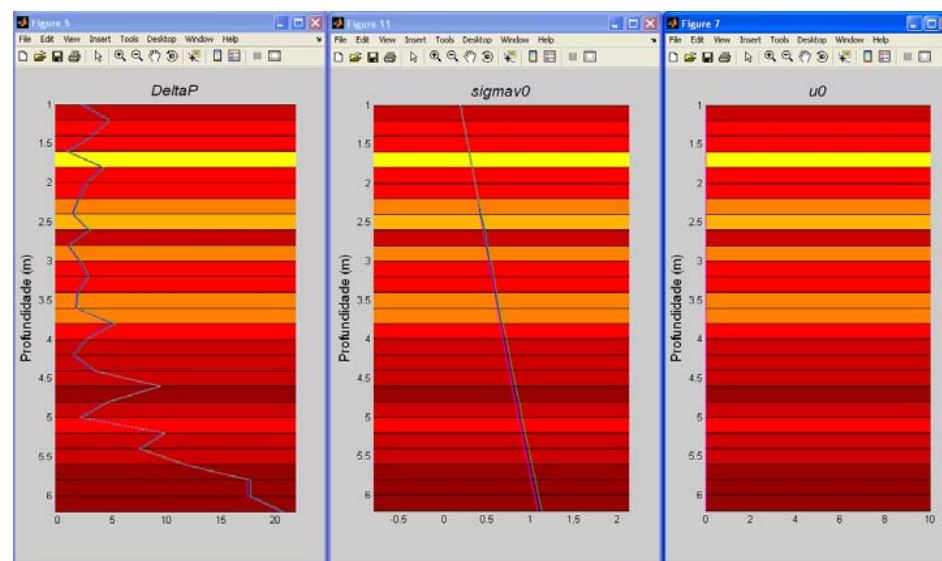
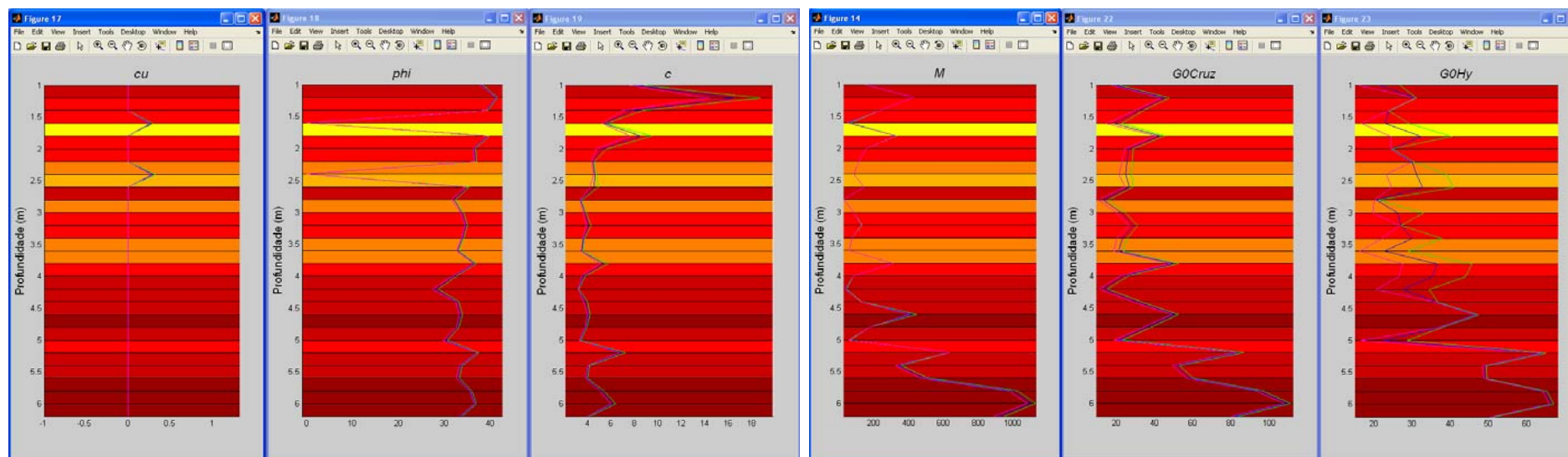
elseif Ed>=10^(1.737+0.585*log10(Id)) &
Ed<10^(2.013+0.621*log10(Id))
    vgama=1.8
elseif Ed>=10^(2.013+0.621*log10(Id)) &
Ed<10^(2.289+0.657*log10(Id))
    vgama=1.9
elseif Ed>=10^(2.289+0.657*log10(Id)) &
Ed<10^(2.564+0.694*log10(Id))
    vgama=2
elseif Ed>=10^(2.564+0.694*log10(Id))
    vgama=2.15
end
end
end

```

ANEXO II

	Aterros									Residuais									Sed. Argilosos									Sed. Arenosos								
	Valor estimado			Erro absoluto			Erro relativo			Valor estimado			Erro absoluto			Erro relativo			Valor estimado			Erro absoluto			Erro relativo			Valor estimado			Erro absoluto			Erro relativo		
	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med
P0	0.5	10.0	2.9	0.1	0.1	0.1	1%	11%	3%	0.5	12.5	4.0	0.1	0.1	0.1	0%	11%	2%	1.1	15.2	4.7	0.1	0.1	0.1	0%	5%	2%	0.8	9.8	2.6	0.1	0.1	0.1	1%	7%	3%
P1	1.4	44.6	12.0	0.1	0.1	0.1	0%	4%	1%	1.1	29.6	11.1	0.1	0.1	0.0	0%	5%	1%	1.3	23.2	6.0	0.1	0.1	0.0	0%	4%	1%	2.0	44.7	15.4	0.1	0.1	0.0	0%	3%	0%
P2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.1	20.6	1.6	0.1	0.1	0.0	0%	50%	13%	0.2	7.0	1.6	0.1	0.1	0.0	1%	25%	6%	0.2	1.9	0.6	0.1	0.1	0.0	3%	33%	11%
u0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.0	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0%	21%	5%	0.0	2.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0%	21%	3%	0.0	1.2	0.4	0.0	0.0	0.0	2%	21%	5%
AP	0.8	34.6	9.1	0.1	0.1	0.1	0%	13%	2%	0.6	25.3	7.1	0.1	0.1	0.1	0%	18%	2%	0.2	9.6	1.4	0.1	0.1	0.1	1%	67%	16%	0.9	41.4	12.8	0.1	0.1	0.1	0%	12%	1%
ED	27.3	1201	316	3.6	3.6	3.6	0%	13%	2%	20.0	876	246	3.6	3.6	3.6	0%	18%	2%	5.5	333	47	3.6	3.6	3.6	1%	67%	16%	31.0	1437	442	3.6	3.6	3.6	0%	12%	1%
ID	0.9	20.8	3.4	0.0	1	0.2	1%	23%	5%	0.7	20.2	1.9	0.0	2	0.1	1%	29%	4%	0.1	1.0	0.3	0.0	0	0.0	2%	73%	18%	0.9	45.7	5.9	0.0	5	0.3	1%	19%	5%
KD	0.5	103.9	8.7	0.0	6.6	0.3	1%	12%	4%	0.9	156.6	10.2	0.0	13.2	0.4	1%	16%	5%	0.2	114.1	4.8	0.0	3.4	0.4	1%	26%	9%	0.5	89.4	5.7	0.0	3.7	0.3	1%	16%	5%
UD	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0.1	6.4	0.4	0.0	0.2	0.0	1%	143%	41%	-0.2	0.7	0.3	0.0	0.1	0.0	2%	356%	15%	-0.1	1.0	0.1	0.0	0.1	0.0	4%	630%	119%
gamma	1.6	2.2	1.9	0.0	0.2	0.0	0%	8%	1%	1.6	2.2	1.9	0.0	0.2	0.0	0%	8%	1%	1.5	2.1	1.7	0.0	0.2	0.1	0%	13%	4%	1.6	2.1	1.9	0.0	0.1	0.0	0%	6%	1%
sigma	0.0	2.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0%	6%	1%	0.0	2.1	0.6	0.0	0.0	0.0	0%	12%	2%	0.0	5.1	1.2	0.0	0.2	0.1	0%	22%	7%	0.0	2.3	0.8	0.0	0.1	0.0	0%	7%	2%
k0	0.3	4.4	0.7	0.0	0.3	0.0	0%	8%	1%	0.3	8.2	0.9	0.0	0.4	0.0	0%	12%	2%	0.3	7.1	1.0	0.0	0.3	0.1	0%	21%	7%	0.4	3.9	0.6	0.0	0.1	0.0	0%	16%	1%
OCR	0.1	3310	83	0.0	400	5.0	1%	49%	9%	0.3	4302	49	0.0	633	5.5	2%	52%	13%	0.0	549	5	0.0	11	0.5	2%	40%	14%	0.1	2483	28	0.0	171	2.9	2%	57%	11%
cu	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.0	2.2	0.6	0.0	0.4	0.1	0%	54%	18%	--	--	--	--	--	--	--	--	--
c'	--	--	--	--	--	--	--	--	--	3.2	1623	215	0.0	239	2.1	1%	42%	8%	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
phi	22.9	48.9	36.3	0.0	0.8	0.2	0%	3%	1%	0.0	49.9	38.8	0.0	0.8	0.2	0%	3%	1%	--	--	--	--	--	--	--	--	--	23.3	48.5	35.4	0.0	1.0	0.3	0%	4%	1%
M	23.2	4255	687	0.1	54.3	8.3	0%	13%	2%	21.4	2132	557	0.0	52.9	1.9	0%	14%	0%	4.6	669	82	0.0	23.7	7.4	0%	80%	21%	26.3	2793	725	0.1	61.5	15.0	0%	15%	2%
G0C	8.6	221	59.1	1.7	2.9	2.0	1%	26%	5%	7.4	180	66.0	1.7	3.2	2.3	1%	36%	5%	6.6	161	35.7	2.8	9.6	5.8	2%	111%	27%	12.2	155	61.0	1.7	3.0	1.9	1%	24%	4%
G0H	13.7	115	43.2	0.0	26.6	2.0	0%	36%	5%	13.6	125	43.8	0.1	46.9	2.4	0%	39%	6%	15.3	127	38.6	0.0	29.1	7.0	0%	67%	21%	13.4	89	45.5	0.0	17.0	2.0	0%	31%	5%





ANEXO III

Teste de Bartlett

```

function [Btest] = Btest(X,alpha)
%Bartlett's Test for Homogeneity of Variances.
%
%   Syntax: function [Btest] = Btest(X,alpha)
%
%   Inputs:
%       X - data matrix (Size of matrix must be n-by-2; data=column
1, sample=column 2).
%       alpha - significance level (default = 0.05).
%   Outputs:
%       - Sample variances vector.
%       - Whether or not the homoscedasticity was met.
%
%   Example: From the example 10.13 of Zar (1999, p. 202-203), to
test the Bartlett's
%           homoscedasticity of data with a significance level =
0.05.
%
%
%           Diet
%           -----
%           1         2         3         4
%           -----
%           60.8      68.7      102.6      87.9
%           57.0      67.7      102.1      84.2
%           65.0      74.0      100.2      83.1
%           58.6      66.3       96.5      85.7
%           61.7      69.8              90.3
%           -----
%
%           Data matrix must be:
%           X=[60.8 1;57.0 1;65.0 1;58.6 1;61.7 1;68.7 2;67.7 2;74.0
2;66.3 2;69.8 2;
%           102.6 3;102.1 3;100.2 3;96.5 3;87.9 4;84.2 4;83.1 4;85.7
4;90.3 4];
%
%           Calling on Matlab the function:
%           BFtest(X)
%
%           Answer is:
%
% The number of samples are: 4
%
% -----
% Sample      Size      Variance
% -----
% 1           5          9.3920
% 2           5          8.5650
% 3           4          7.6567
% 4           5          8.3880
% -----
%
% Bartlett's Test for Equality of Variances X2=0.0328, df= 3, F=
0.0109, df1= 3, df2=14
% Probability associated to the Chi-squared statistic = 0.9984
% The associated probability for the Chi-squared test is equal or
larger than 0.05
% So, the assumption of homoscedasticity was met.
%
%
% Created by A. Trujillo-Ortiz and R. Hernandez-Walls

```

```

%          Facultad de Ciencias Marinas
%          Universidad Autonoma de Baja California
%          Apdo. Postal 453
%          Ensenada, Baja California
%          Mexico.
%          atrujo@uabc.mx
%
% April 20, 2003.
%
% To cite this file, this would be an appropriate format:
% Trujillo-Ortiz, A. and R. Hernandez-Walls. (2003). Btest:
Bartlett's test for
% homogeneity of variances. A MATLAB file. [WWW document]. URL
http://www.mathworks.com/
%
matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=3314&objectType=FILE
%
% References:
%
% Zar, J. H. (1999), Biostatistical Analysis (2nd ed.).
% NJ: Prentice-Hall, Englewood Cliffs. p. 202-203.
%

if nargin < 2,
    alpha = 0.05;
end

k=max(X(:,2));
fprintf('The number of samples are:%2i\n\n', k);

n=[];s2=[];
indice=X(:,2);
for i=1:k
    Xe=find(indice==i);
    eval(['X' num2str(i) '=X(Xe,1);']);
    eval(['n' num2str(i) '=length(X' num2str(i) ') ;']);
    eval(['s2' num2str(i) '=(std(X' num2str(i) ').^2) ;']);
    eval(['xn= n' num2str(i) ';']);
    eval(['xs2= s2' num2str(i) ';']);
    n=[n;xn];s2=[s2;xs2];
end

fprintf('-----\n');
disp(' Sample      Size      Variance')
fprintf('-----\n');
for i=1:k
    fprintf('      %d      %2i      %.4f\n',i,n(i),s2(i))
end
fprintf('-----\n');
disp(' ')

%Bartlett's Procedure.
deno=sum(n)-k;
suma=0;
for i=1:k
    eval(['suma =suma + (n' num2str(i) '-1)*s2' num2str(i) ';']);
end
Sp=suma/deno;
Falta=0;
for i=1:k
    eval(['Falta =Falta + (n' num2str(i) '-1)*log(s2' num2str(i)
        ');']);
end

```

```

end
B=((sum(n)-k)*log(Sp))-Falta;
suma1=0;
for i=1:k
    eval(['suma1=suma1 + 1/(' num2str(i) '-1);']);
end
suma2=0;
for i=1:k
    eval(['suma2=suma2 + 1/(((' num2str(i) '-1)^2);']);
end
C=1+((1/(3*(k-1)))*(suma1-(1/deno)));
X2=B/C; %Chi-squared-statistic.
v=k-1; %degrees of freedom.
F=X2/v; %F-statistic.
P = 1 - chi2cdf(X2,v) %probability associated to the Chi-squared-
statistic.
df=v;
df1=v;df2=sum(n)-k-1;

fprintf('Bartlett''s Test for Equality of Variances X2=%3.4f, df=%2i,
F=%7.4f, df1=%2i, df2=%2i\n', X2,df,F,df1,df2);
fprintf('Probability associated to the Chi-squared statistic =
%3.4f\n', P);

if P >= alpha;
    fprintf('The associated probability for the Chi-squared test is
equal or larger than% 3.2f\n', alpha);
    fprintf('So, the assumption of homoscedasticity was met.\n');
else
    fprintf('The associated probability for the Chi-squared test is
smaller than% 3.2f\n', alpha);
    fprintf('So, the assumption of homoscedasticity was not met.\n');
end

```